

陈金珂, 蒲俊兵, 李建鸿, 等. 基于土地利用情景模拟的喀斯特关键带生态系统服务权衡与协同分析: 以蒙自喀斯特断陷盆地为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 94-108.

DOI: 10.11932/karst20230108

# 基于土地利用情景模拟的喀斯特关键带生态系统服务权衡与协同分析 ——以蒙自喀斯特断陷盆地为例

陈金珂<sup>1,3</sup>, 蒲俊兵<sup>2</sup>, 李建鸿<sup>1</sup>, 张陶<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 重庆师范大学地理与旅游学院长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室/三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331; 3. 西南大学地理科学学院重庆市岩溶环境学重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:**以蒙自喀斯特断陷盆地为例, 利用 CLUE-S 模型设置自然演化、微度、适度、强力生态治理情景并探究 2030 年不同情景对生态系统服务的影响及权衡与协同特征。结果表明: (1) 2018 年蒙自喀斯特断陷盆地植被净初级生产力(NPP)、产水量、覆盖型喀斯特区土壤保持量、裸露型喀斯特区土壤保持量、食物供给量分别增加了 13.98%、38.97%、23.04%、25%、105.43%, 且各种服务变化存在一定的空间差异性; (2) 随着生态治理力度加大, 2030 年 NPP 和土壤保持量不断增加, 产水量不断减少, 食物供给量在强力生态治理情景下减少, 在其他三种情景下增加; (3) NPP 与产水量、食物供给量为权衡关系, 与土壤保持量为协同关系; 产水量与土壤保持量为权衡关系, 与食物供给量为协同关系; 土壤保持量与食物供给量为权衡关系; (4) 相较于 2018 年, 适度生态治理情景下四种生态系统服务之间的协调性最好, 是较为合理的生态治理模式。

**关键词:**石漠化; 生态系统; CLUE-S 模型; 权衡与协同; 喀斯特断陷盆地

中图分类号: F301.2; X171.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)01-0094-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

生态系统服务是人类可从生态系统中得到的各种惠益, 主要包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务<sup>[1-2]</sup>。这些生态系统服务相互作用、相互联系, 是人类生存和发展过程中必不可少的基本条件之一。当今世界城市化和工业化进程不断加快, 一些关键类型的服务尤其是调节服务和文化

服务的供给能力在不断衰减, 区域和全球生态安全都受到严重威胁<sup>[3]</sup>。因此探究生态系统服务及其之间的相互关系对自然资源利用和生态环境保护具有重要意义。

土地利用对生态系统服务及其相互关系转化具有十分重要的影响<sup>[4]</sup>。快速的土地利用变化直接而显著地改变着生态系统结构以及整个生态系统, 其不但会导致地表状况的转变, 也会在很大程度上影

基金项目: 国家重点研发计划项目“不同气候区喀斯特关键带水文—生态耦合过程对比研究”(2021YFE0107100); 重庆师范大学基金项目(21XRC002)

第一作者简介: 陈金珂(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事喀斯特环境与全球变化研究。E-mail: 17839164069@163.com。

通信作者: 蒲俊兵(1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事喀斯特环境学、喀斯特水文地球化学研究。E-mail: junbingpu@163.com。

收稿日期: 2022-03-08

响区域气候、水文、土壤、生物多样性以及区域地球生物化学循环等<sup>[4-7]</sup>。例如,始于 1999 年的退耕还林工程,已经使得近  $2.33 \times 10^5 \text{ km}^2$  的耕地转化为林地,这直接影响区域生态系统服务(水循环、土壤侵蚀等)及其之间的关系<sup>[4]</sup>。目前通过情景分析法模拟土地利用变化逐渐成为研究生态系统服务的有效方式<sup>[8]</sup>。该方法主要是通过土地利用方式的驱动因子(如气候、社会经济因素和区域政策条件等)来确定不同土地利用类型的用地需求,并将其作为未来不同土地利用方式相互转化的依据<sup>[9]</sup>。它有利于揭示土地利用变化对未来生态系统服务的供给能力、相互作用和整体效益的影响,也有助于确定未来某种生态系统服务的最大供给能力,确定不同时空范围内生态系统服务间的权衡与协同关系<sup>[10-11]</sup>。

喀斯特关键带处于岩石、水、土壤、大气、生物五圈交汇带,受到五大圈层提供的喀斯特动力作用,能够敏感地感应外部环境的变化,是中国重要的生态屏障区之一。石漠化问题是喀斯特关键带普遍存在的生态环境问题之一。为提高喀斯特区人民福祉,加快建设美丽中国的步伐,国家正在进行大规模的石漠化治理。转变土地利用方式是石漠化治理的重要手段。它通过对各种土地利用类型进行合理调配,不断增加石漠化地区的植被覆盖度,减少人类活动对于区域生态环境的负面影响,进而恢复生态系统平衡<sup>[12]</sup>。因此,情景模拟法在喀斯特区得到很好推广。Lang 等<sup>[13]</sup>利用 CLUE(The Conversion of Land Use and its Effects modeling framework)模型设置自然情景、经济发展情景和生态保护情景对广西和贵州等喀斯特区 2030 年的土地利用状况进行预测,在此基础上对该地区的产水量进行评价,结果表明在自然情景下产水量呈现波动减少趋势,但在经济发展情景下 2030 年的产水量相对于 2010 年增长 1.25%。吕国屏等<sup>[14]</sup>利用 CA-Markov 模型在喀斯特区县域尺度进行 2021 年生态系统服务价值动态模拟,认为退耕还林(草)政策是生态系统服务价值发生变化的主要原因,按照 1990-2015 年退耕还林趋势,普定县生态系统服务价值将呈现下降趋势。操玥等<sup>[15]</sup>在利用 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)模型评价喀斯特槽谷区土壤侵蚀时空演变特征的基础上,通过 CA-Markov 模型对未来土壤侵蚀状况进行预测,结果显示:到 2020 年槽谷区土壤侵蚀等级以微度和轻度侵蚀为主,土壤侵蚀状况会得到进一步

改善。以上研究侧重于生态系统服务评估,鲜有人利用情景分析法探究喀斯特区未来生态系统服务之间的权衡与协同关系,以确定最为协调的土地利用方式。

云南蒙自喀斯特断陷盆地长期以来面临严重的石漠化问题。尽管区域自 2006 年开始实施大规模石漠化治理工程,但未来发展态势尚不明晰。通过合理转变土地利用方式明确生态系统服务及其之间的权衡与协同关系,确定生态系统服务两者甚至多者之间的最优结合点对于区域生态结构合理转变、保障区域生态安全意义重大。本文通过土地利用情景模拟明确蒙自喀斯特断陷盆地未来石漠化治理的重点和方向,以期为区域发展提供科学参考。

## 1 研究区概况

蒙自喀斯特断陷盆地位于云南省红河哈尼族彝族自治州蒙自市、开远市和个旧市境内(图 1)。盆地范围与我国第三大喀斯特地下河系统——南洞地下河的流域范围几近吻合,面积约  $1\ 618 \text{ km}^2$ ,是一个十分独特且典型的喀斯特水文地质单元。盆地整体属珠江流域红水河上游南盘江水系,区内地表水系极不发达,无常年性地表河,仅在东部高原面上发育有三条小型地表河<sup>[16]</sup>,但地下河系统发育,由多条分支组成,径流复杂,水量丰富<sup>[17]</sup>。依据喀斯特地质状况,研究区可分为覆盖型喀斯特区和裸露型喀斯特区两部分。覆盖性喀斯特区位于盆地区,上覆第三系沉积物,平均海拔在  $1\ 300 \text{ m}$  左右。裸露型喀斯特区主要位于山区和盆地北部零星分布的浅丘地区,岩性以石灰岩和白云岩为主,平均海拔在  $2\ 200 \text{ m}$  左右。此外,该区域为典型的亚热带高原季风气候,夏长无冬,年温差较小,日温差较大,干湿季分明,干旱现象频发。

资料显示,蒙自喀斯特断陷盆地历史上植被覆盖较好,原始森林植被以亚热带常绿阔叶林为主<sup>[18]</sup>。但是由于不合理的开发方式导致原有森林植被遭受破坏。现存森林大多是人工林,以及次生林、灌木林,石漠化问题突出。经过石漠化治理工程的不断推进,环境状况得到一定改善,植被覆盖度总体呈现增加趋势,但目前石漠化问题仍较为突出,存在大面积的坡耕地,生态系统协调性亟待提高。

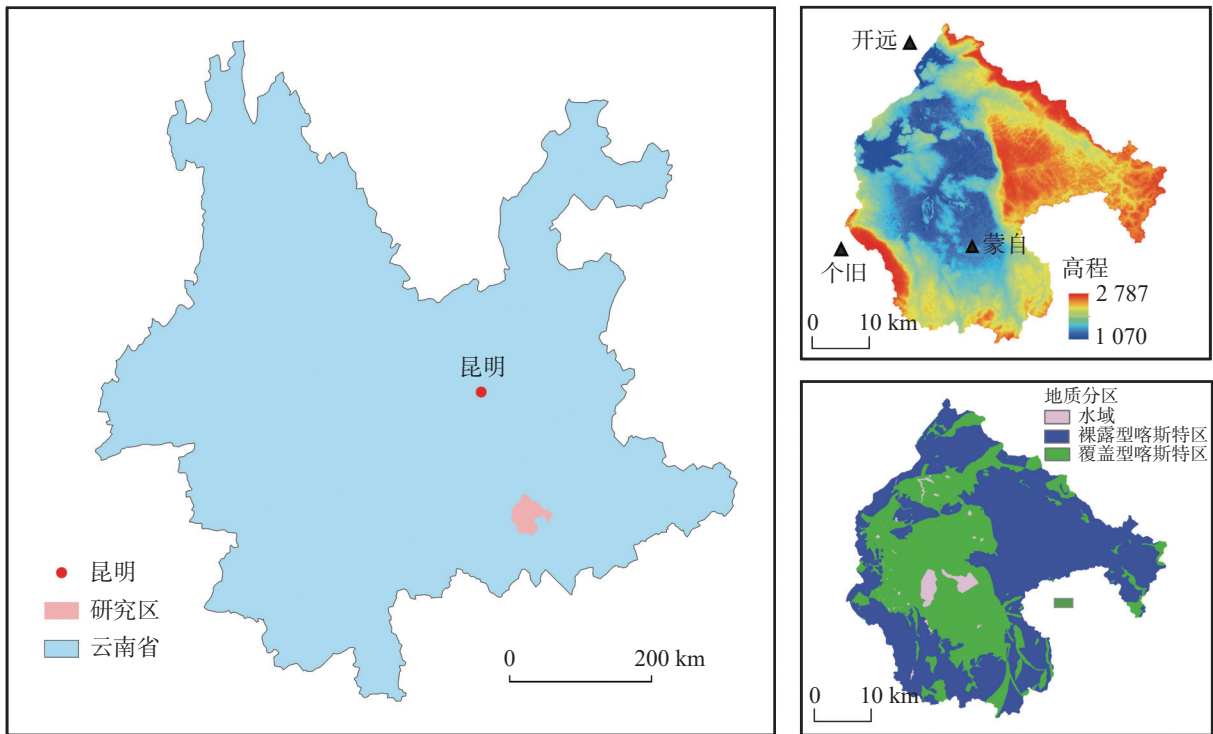


图1 研究区位置及范围

Fig. 1 Location map of the study area

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

本文所利用的基础数据主要包括:气象、遥感、社会经济等数据。其中气象数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),所用气象指标包括降水、气温、湿度、风速等。该数据是进行NPP、产水量和土壤保持量计算的关键。本文从地理空间数据云(<http://data.cma.cn>)下载Landsat系列数据,并在ENVI5.3中采用监督分类法进行土地利用类型划分。此外本文还通过该数据采用像元二分法模型计算出植被覆盖度后评价石漠化状况。DEM(Digital Elevation Model)数据也来自于地理空间数据云,依此进行坡度和坡向划分并利用其进行坡度和坡长因子的计算。土壤属性和质地数据来源于寒区旱区科学数据中心(<http://sdb.casnw.net>),用于计算土壤可蚀性因子和植物可利用含水量。社会经济数据主要来自于2006、2012、2018年红河哈尼族彝族自治州及各区县统计年鉴,包括人口密度、地区生产总值、粮食产量等。道路数据通过91地图进行矢量化。

### 2.2 CLUE-S模型与情景设置

CLUE-S模型是Verburg等<sup>[19]</sup>改进了的CLUE

模型,它具有较高精度,且能够用于空间尺度的土地利用模拟。该模型是当前研究土地利用空间分布与优化配置的重要模型之一,特别是在小范围土地利用优化与配置方面具有十分显著的优越性<sup>[20]</sup>。模型假设某地区在一定时期内的土地利用空间布局与自然、社会、经济因素处于动态平衡状态,利用土地利用和与其相关的驱动因素(自然、社会因素等)之间的经验量化关系,并按照土地利用类型之间相互转化规律进行土地利用类型动态模拟。考虑到蒙自喀斯特断陷盆地的实际状况,采用该模型对未来土地利用进行模拟。

在自然因素和人类活动的双重影响下,蒙自喀斯特断陷盆地长期以来面临严重的石漠化问题。自20世纪80年代开始,该区域实施了一系列生态工程措施进行石漠化治理。2006年起,区域响应国家号召,开始大规模的石漠化综合治理工作,退耕还林面积不断增加,石漠化呈现逐渐向好的趋势。退耕还林还草的基本原则是坡度 $>25^\circ$ 的耕地必须退耕,  $15^\circ$ 以上的耕地有计划退耕,  $15^\circ\sim 25^\circ$ 出现石漠化的耕地也必须实行退耕还林<sup>[21]</sup>。随着可持续发展观的深入人心,近年来蒙自市根据“做好石漠化综合治理项目,带动产业发展,促进农民增收脱贫”的思路,根据蒙



自断陷盆地自身的气候和环境优势发展特色产业,对石漠化治理进行合理优化布局。本研究根据蒙自喀斯特断陷盆地石漠化综合治理现实状况、《红河哈尼族彝族自治州土地利用总体规划(2010-2020年)》以及《喀斯特地区植被恢复技术规程 LY\_T 1840-

2020》,设置自然情景、微度生态治理情景、适度生态治理情景、强力生态治理情景对 2030 年土地利用状况进行模拟,确定最佳生态治理方式,促进石漠化治理效益最大化(表 1)。

表 1 蒙自喀斯特断陷盆地未来土地利用情景设置规则  
Table 1 Rules for setting future land use scenarios in MKGB

情景	描述
自然情景	按照2012-2018年土地演化趋势确定。
微度生态治理情景	坡度>25°的耕地转化为林地; 15°~25°坡度范围内轻度石漠化区的耕地转化为果园; 15°~25°坡度范围内中重度石漠化区的耕地转化为林地。
适度生态治理情景	坡度>20°的耕地转化为林地; 15°~20°坡度范围内轻度石漠化区的耕地转化为果园; 15°~20°坡度范围内中重度石漠化区的耕地转化为林地。
强力生态治理情景	坡度>15°的耕地转化为林地。

### 2.3 生态系统服务评价

本文主要对区域 NPP、产水量、土壤保持量、食物供给量四种生态系统服务进行评价。

#### (1) CASA 模型

CASA(Carnegie-Ames Stanford Approach)模型是在光合有效辐射和光能利用效率的基础上引入遥感、气象、植被等因子计算区域 NPP 的过程模型,它被广泛用于全球和区域生产力的估算<sup>[22]</sup>。中国学者朱文泉对该模型进行了改进使之更符合中国的实际情况。因此,本文利用改进模型计算 NPP,计算方法参考相关文献<sup>[23]</sup>。

#### (2)产水量模型

InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型产水量模块主要是根据水量平衡原理以栅格为单元,由各个单元的实际降水量减去实际蒸散量计算得到<sup>[24]</sup>。本文利用该模块进行产水量评估。该模块涉及的数据较多,计算较为复杂,各部分的计算方法可参考文献<sup>[25]</sup>、<sup>[26]</sup>。

#### (3)RUSLE 模型

本文利用 RUSLE 模型计算土壤保持量。土壤保持量为潜在土壤侵蚀和实际土壤侵蚀之间的差值。蒙自喀斯特断陷盆地分为覆盖型喀斯特区和裸露型喀斯特区两部分。其中覆盖型喀斯特区被较厚的土层覆盖,裸露型喀斯特区石漠化严重。Dai 等<sup>[27]</sup>通过人工降雨模拟发现表层土壤侵蚀与基岩裸露率呈负相关关系。Gao 等<sup>[28]</sup>据此对 RUSLE 模型进行改进使之适合基岩裸露的喀斯特区土壤侵蚀评价。因为

该研究区中覆盖型喀斯特区土层较厚故不再采用改进模型。模型中涉及到降雨侵蚀力因子(P)、土壤可蚀性因子(K)、坡度坡长因子(LS)、植被覆盖与管理因子(C)、水土保持措施因子(P)。文中利用 CREAMS 模型对 P 因子进行计算<sup>[29]</sup>,利用 EPIC 模型计算 K 因子<sup>[30]</sup>,利用张宏鸣研发的 LS-TOOL 进行坡度坡长因子的计算。此外,C、P 因子主要是根据蔡崇法<sup>[31]</sup>、许月卿<sup>[32]</sup>、杨子生<sup>[33]</sup>等的研究进行赋值。

#### (4)食物供给量模型

民以食为天,食物供给是生态系统的重要供给服务,也是人类从生态系统中获取的最根本的物质,其供给能力的大小直接影响着区域可持续发展。结合土地利用类型数据和统计年鉴数据,计算蒙自喀斯特断陷盆地的食物供给量,其计算公式如下:

$$G_i = A_i \times N_i \quad (1)$$

$$N_i = F_i / S_i \quad (2)$$

式中:  $G_i$  表示食物  $i$  的总产值;  $A_i$  表示食物  $i$  的面积;  $N_i$  表示食物  $i$  的单位面积产值;  $F_i$  表示食物  $i$  的总产值;  $S_i$  表示食物  $i$  的总面积。

### 2.4 权衡与协同分析

生态系统服务相互作用、相互联系,具体表现为权衡与协同<sup>[34]</sup>。权衡是指一种生态系统服务供给能力的提高导致其他一种或多种生态系统服务供给能力的下降<sup>[35]</sup>。协同则是指生态系统服务的供给能力同增同减,相互增益<sup>[35]</sup>。本文利用相关分析法对生态系统服务之间的关系进行评价。当生态系统服务为

正相关且通过显著性检验时二者为协同关系, 否则为权衡关系, 相关系数的大小表示权衡和协同关系的强弱<sup>[36]</sup>。此外, 为进一步说明生态系统服务之间的关系, 利用 Z 值标准化方法对 2030 年各种情景下四种生态系统服务之间的权衡与协同效应做进一步探究。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用特征及预测

##### 3.1.1 土地利用变化

蒙自喀斯特断陷盆地是红河州重点基本农田建

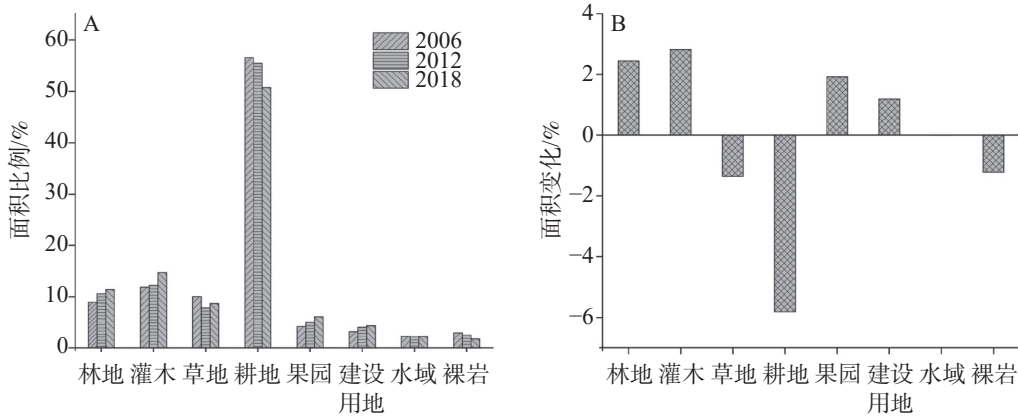


图2 2006-2018年蒙自喀斯特断陷盆地土地利用变化

A. 2006-2018年土地利用状况 B. 2006-2018年土地利用变化率

Fig. 2 Change of land use in MKGB from 2000 to 2018

##### 3.1.2 2030年不同情景下土地利用变化

为验证 CLUE-S 模型在蒙自喀斯特断陷盆地的适用性, 本研究利用 2012 和 2018 年的土地利用数据进行模拟。结果显示: 总体地类模拟精度为 80.93%, Kappa 系数为 0.782 1, 介于 0.75~1 之间。这说明 CLUE-S 模型可达到较高的模拟精度和更为等效的景观格局。因此, CLUE-S 模型及相关参数能够较为准确地反映蒙自喀斯特断陷盆地土地利用的实际变化。借助该模型并利用 2018 年土地利用数据预测蒙自喀斯特断陷盆地 2030 年的土地利用状况。

模拟发现: 相较于 2018 年, 2030 年蒙自喀斯特断陷盆地在四种情景下耕地和裸岩的面积呈现不断减少趋势, 林地、灌木、草地、果园和建设用地的面积呈现不断增加趋势。耕地面积减少, 主要是转化为林地、灌木、果园或建设用地, 裸岩面积减少, 主要是向草地转化。各种植被覆盖面积不断增加除了石漠化治理措施的不断实施, 也得益于植被之间的

自然演替。果园和建设用地面积增加, 主要来自于耕地的转化, 而水域面积变化较少。由于实施不同强度的生态治理措施, 在四种情景下研究区的耕地、果园、林地面积有所不同(表 2, 图 3)。自然情景下, 耕地面积减少了 154.50 km<sup>2</sup>, 林地增加的面积为 24.66 km<sup>2</sup>; 强力生态治理情景下耕地减少的面积为 215.82 km<sup>2</sup>, 林地增加的面积为 152.74 km<sup>2</sup>, 果园增加的面积为 28.52 km<sup>2</sup>; 适度生态治理情景下果园增加的面积为 34.26 km<sup>2</sup>, 耕地减少的面积为 208.72 km<sup>2</sup>, 林地增加的面积为 138.81 km<sup>2</sup>; 微度生态治理情景下耕地减少的面积为 202.31 km<sup>2</sup>, 果园和林地增加的面积分别为 34.24 km<sup>2</sup>、126.39 km<sup>2</sup>。

#### 3.2 生态系统服务特征及预测

##### 3.2.1 生态系统服务时空变化

蒙自喀斯特断陷盆地高原区 NPP 的空间分布格局为高原区大于盆地区(图 4)。这是因为高原是该

表 2 2030 年蒙自喀斯特断陷盆地耕地、果园和林地面积相较于 2018 年的变化状况 (km<sup>2</sup>)Table 2 Projected changes of cultivated land, orchard land and forest land in Mengzi karst graben basin in 2030 compared with the changes in 2018 (km<sup>2</sup>)

	自然情景	微度生态治理情景	适度生态治理情景	强力生态治理情景
耕地减少面积	154.50	202.31	208.72	215.82
果园增加面积	32.53	34.24	34.26	28.52
林地增加面积	24.66	126.39	138.81	152.74

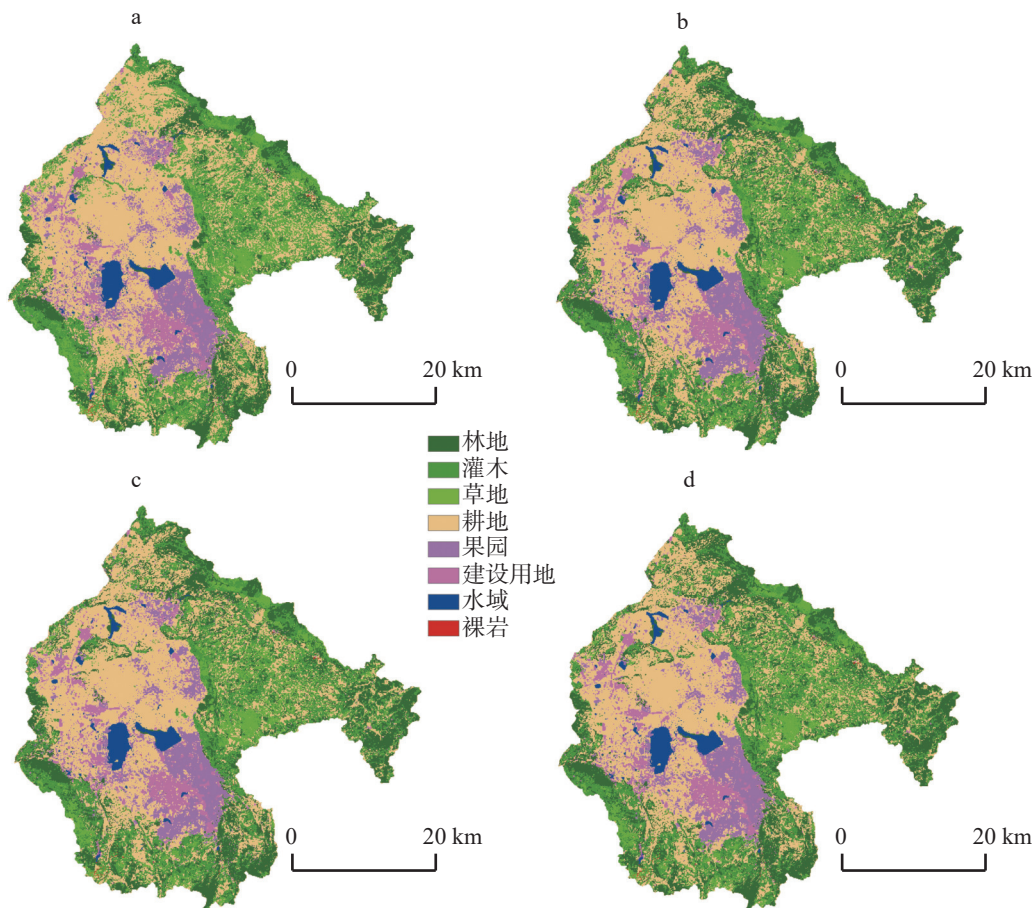


图 3 2030 年不同情景下蒙自喀斯特断陷盆地土地利用状况

a.自然演化情景 b.微度生态治理情景 c.适度生态治理情景 d.强力生态治理情景

Fig. 3 Land use of MKGB in different scenarios

区域主要的植被覆盖区,固碳能力较强,而盆地中的土地主要用于居住和耕作。相较于 2006 年,2018 年整个区域 NPP 呈现明显的增加趋势,其中高原区比盆地区的增长趋势更为明显。这反映出该区域十多年的石漠化治理工作正稳步推进。NPP 减少的区域主要集中在盆地的南部及高原区的边缘。

该区域产水量总体呈现出高原区高于盆地区空间格局(图 4)。相较于 2006 年,2018 年区域产水量呈现增长趋势和明显的南北差异,北部增长范围远大于南部。以往研究发现植被冠层能够拦截降水且蒸腾量较大,产水量随着生态用地的增加呈现减

少趋势<sup>[37]</sup>,但蒙自喀斯特断陷盆地产水量有悖于这一趋势。这主要受控于区域气候变化,研究表明产水量与降水量有很好的正相关关系<sup>[24]</sup>。分析发现 2018 年区域降雨量明显增加,这说明 2018 年区域气候条件在一定程度上削弱了土地利用对于产水量的影响。

考虑到区域特殊的地质状况,本文将区域分为覆盖型喀斯特区和裸露型喀斯特区两部分进行土壤保持量评价。在空间上,裸露型喀斯特区的土壤保持量高于覆盖型喀斯特区(图 4)。这与植被和坡度的空间分布趋势较为一致。对比 2006 年,2018 年区



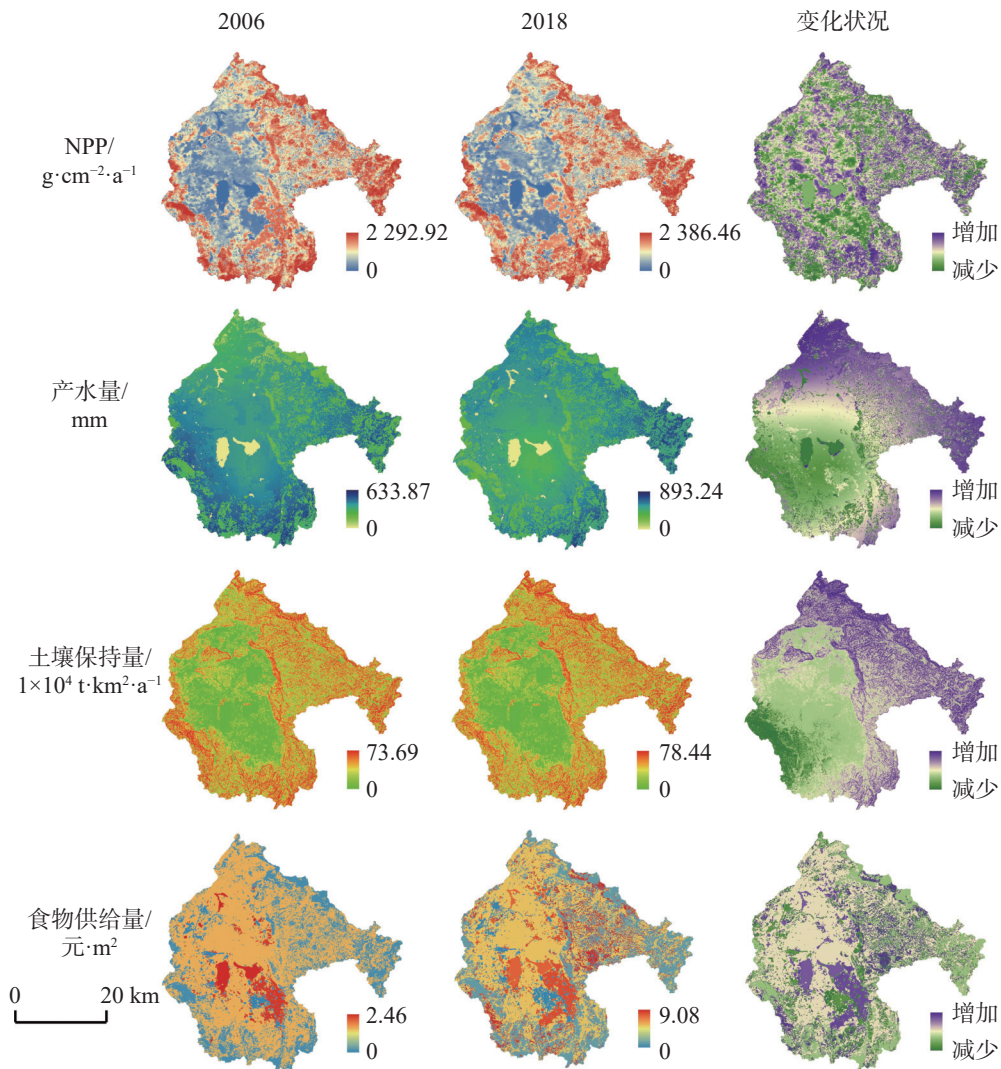


图4 2006-2018年蒙自喀斯特断陷盆地生态系统服务变化

Fig. 4 Change of ecosystem services from 2006 to 2018 in MKGB

域土壤保持量也呈现增长趋势,其中裸露型喀斯特区的增长范围比覆盖型喀斯特区大,但在区域的西南部区域出现了减少趋势。

蒙自喀斯特断陷盆地的食物供给能力呈现盆地区大于高原区的空间分布趋势(图4)。这是因为区域农业用地主要位于盆地区。2018年区域食物供给能力高于2006年,尤其是盆地区呈现出显著增加趋势,这与区域不断改进耕作措施,农产品价值量不断提高密切相关。

### 3.2.2 2030年不同情景下生态系统服务变化

根据不同情景下2030年土地利用类型模拟结果,沿用2018年的气候数据计算2030年蒙自喀斯特断陷盆地NPP、产水量、土壤保持量及食物供给量四种生态系统服务功能,并将其与2018年的状况进

行比较。

不同情景下NPP均值均有所提高(图5),其中自然情景下NPP均值最低,为 $1\ 059.78\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,相较于2018年提高了3.56%;强力生态治理措施下NPP均值最高,为 $1\ 102.64\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,相较于2018年提高了7.75%;微度和适度生态治理情景下NPP均值为 $1\ 093.67\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1\ 096.72\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,比2018年分别提高了6.88%、7.17%。这表明生态恢复对提高区域植被生产力具有促进作用,随着植被覆盖面积的增加,NPP增加的幅度也就越大。

四种情景下的产水量均出现减少趋势(图5)。在自然情景下产水量为617.21 mm,产水总量为 $9.98\times 10^8\ \text{m}^3$ ,比2018年的产水量减少了1.92%;在微度生态治理措施下产水量为610.58 mm,产水总量为 $9.87\times 10^8\ \text{m}^3$ ,相较于2018年减少了2.97%;适度生

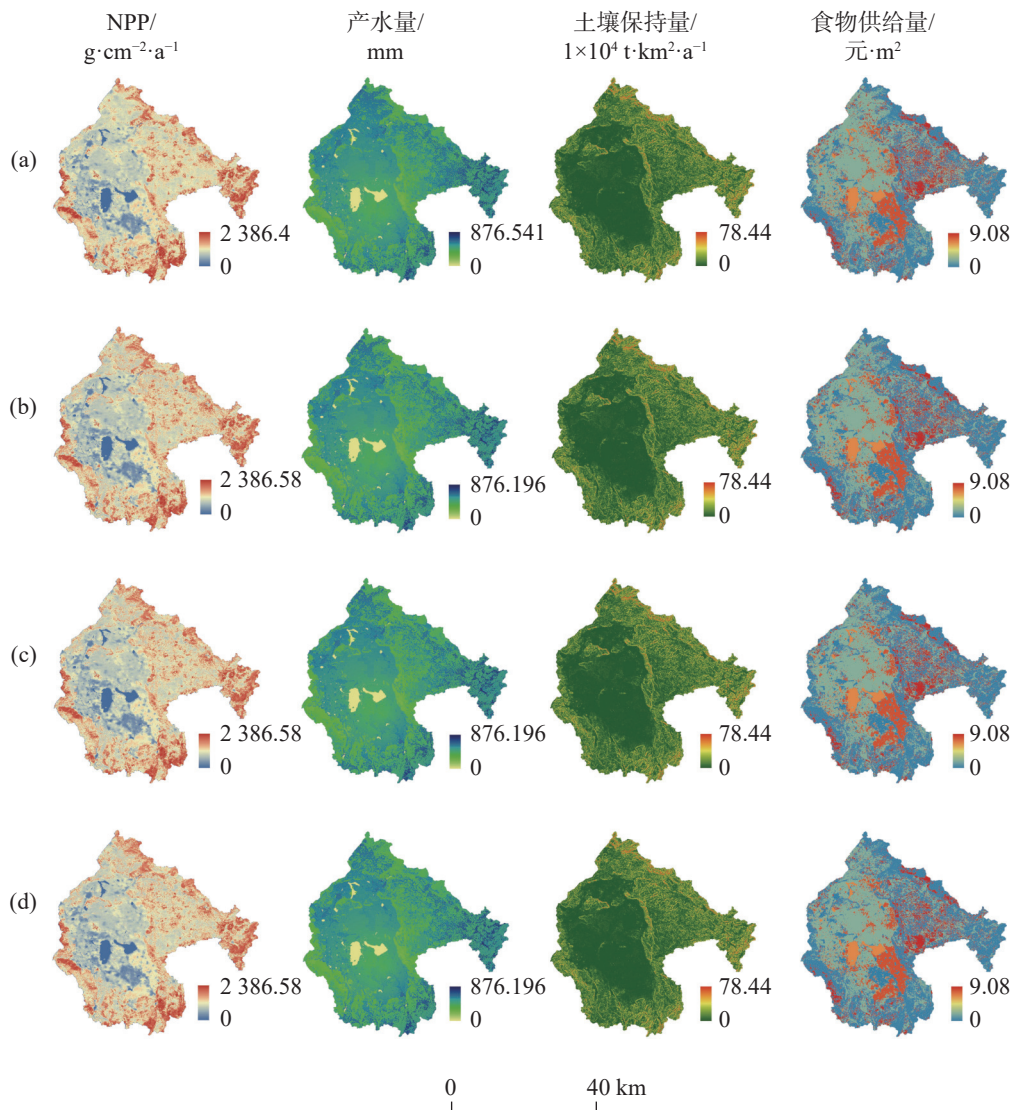


图 5 不同情景下蒙自喀斯特断陷盆地生态系统服务评价

a.自然演化情景 b.微度生态治理情景 c.适度生态治理情景 d.强力生态治理情景

Fig. 5 Ecosystem services of MKGB in different scenarios

态治理措施下产水量为 609.89 mm, 产水总量为  $9.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 比 2018 年减少了 3.08%; 强力生态治理措施下, 产水量为 608.47 mm, 产水总量为  $9.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 比 2018 年减少了 3.31%。随着生态治理力度的加大, 产水服务呈现降低趋势, 说明生态恢复会在一定程度上造成产水量减少。

在不同情景下裸露型喀斯特区和覆盖型喀斯特区的土壤保持量相较于 2018 年都得到了一定程度的增加(图 5)。四种情景下覆盖型喀斯特区土壤保持量分别为  $2.536 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $2.537 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $2.542 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $2.549 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 相较于 2018 年分别增加了 1.04%、1.08%、1.27%、1.55%; 四种情景下裸露型喀斯特区土壤保持量分别为  $7.237 \times$

$10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $7.278 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $7.280 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $7.281 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 相较于 2018 年分别提高了 0.50%、1.08%、1.11%、1.13%。生态治理措施的实施会促进土壤保持量的增加, 主要是由于植被覆盖度的提高。因此, 对土壤侵蚀进行治理时必须密切关注植被的影响。

四种情景下食物供给量相较于 2018 年也出现了一定的变化(图 5)。其中自然情景下食物供给量呈现明显的增加趋势, 微度和适度生态治理情景下增加量较少, 强力生态治理措施下呈现减少趋势。自然情景下食物供给量为  $43.02 \times 10^8 \text{ 元}$ , 相较于 2018 年增加了 6.41%。这主要是因为自然情景下草地的面积增加最多, 因此其供给量得到大幅度提高。



微度和适度生态治理情景下食物供给量分别为  $40.98 \times 10^8$  元、 $40.88 \times 10^8$  元, 相较于 2018 年分别增加了 1.36%、1.11%, 比自然情景下分别减少了 4.74%、4.97%。这是因为微度和适度生态治理情景相较于自然情景林地面积增加, 草地和耕地面积减少, 使得供给量相对下降, 相较于 2018 年增加的部分也主要来自于草地。强力生态治理措施下食物供给量最低为  $40.26 \times 10^8$  元, 相较于 2018 年减少了 0.42%, 这和大幅度增加的林地面积密不可分。这也说明大幅度的生态治理措施可能会导致区域食品安全受到一定程度影响。

### 3.3 生态系统服务权衡与协同

相关分析结果表明: NPP 与产水量和食物供给量为权衡关系, 与土壤保持量为协同关系; 产水量与

土壤保持量为权衡关系, 与食物供给量为协同关系; 土壤保持量与食物供给量为权衡关系(表 3)。2030 年不同情景下权衡与协同关系的程度有所差别: 自然情景下 NPP 与产水量和食物供给量之间的冲突最小, 与土壤保持量之间的相互促进作用最小, 在该情景下产水量与土壤保持量之间的权衡度最小, 但是与食物供给量之间的协同度也最小; 微度生态治理措施下 NPP 与产水量, 产水量和土壤保持量之间的权衡度最大, 土壤保持量与食物供给量之间的权衡度最小; 强力生态治理措施下 NPP 与土壤保持量的协同度最高, 但是 NPP 与食物供给量的冲突最强, 在强力生态治理情景下产水量与食物供给量之间的权衡度也最强; 适度生态治理措施下各种生态系统服务之间的权衡关系都介于三种情景之中, 因此是四种情景下对生态系统服务平衡最为有利的情景。

表 3 不同情景下生态系统服务权衡与协同关系

Table 3 Relationship between trade-off and synergy of ecosystem services in different scenarios

	NPP—产水量	NPP—土壤保持	NPP—食物供给	产水量—土壤保持	产水量—食物供给	土壤保持—食物供给
自然情景	-0.473**	0.362**	-0.377**	-0.122**	0.307**	-0.134**
微度生态治理情景	-0.524**	0.444**	-0.414**	-0.261**	0.403**	-0.074**
适度生态治理情景	-0.508**	0.451**	-0.412**	-0.252**	0.358**	-0.170**
强力生态治理情景	-0.515**	0.453**	-0.417**	-0.260**	0.360**	-0.175**

注: \*\*表示通过了显著性检验。

此外, 利用 Z 值标准化方法对 2030 年各种情景下生态系统服务之间的权衡与协同效应做进一步探究(图 6)。通过标准化发现当前状况下(2018 年)产水量和食物供给量相对较高, NPP 和土壤保持量较低, 说明供给服务与调节服务之间的冲突较强。在自然情景下, 随着产水服务的减少, NPP 与土壤保持量增加, 说明三者之间的权衡关系有所减弱。但是食物供给量出现一定的增加, 生态系统服务之间的协调性仍然较差。在强力生态治理措施下, NPP 与土壤保持量明显增加, 但是食物供给量和产水量相比于其他情景减少得也较多, 因此生态系统服务之间的协调性也较为不理想。微度和适度生态治理措施下生态系统服务之间的协调性较为接近, NPP、土壤保持量相较于 2018 年和自然情景下有所提高, 产水量比 2018 年和自然情景下有所减少, 食物供给量相较于 2018 年有所增加, 但是相比于自然情景下有所减少。因此, 相对于 2018 年、自然情景、强力生态治理情景, 微度/适度生态治理情景下生态系统服务

的协调性增强。结合微度和适度生态治理措施下各种生态系统服务之间的相关系数, 认为适度生态治理措施下生态系统协调性最强。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

#### 4.1.1 生态系统服务对生态治理措施的响应

中国喀斯特面积达  $3.44 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的三分之一, 其中西南喀斯特区是世界上最大的连续性碳酸盐岩分布区<sup>[38]</sup>。受制于气候、人类活动等的影 响, 该区域出现严重的石漠化问题<sup>[39]</sup>。统计显示: 截至到 2016 年底, 中国石漠化面积达  $10.07 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[40]</sup>。目前石漠化仍然是制约区域可持续发展的一大障碍, 相关的生态系统服务尤其是调节服务的供给能力正受到巨大威胁。为提高人类福祉, 国家自 1999 年开始实施各种生态保护工程, 退耕还林还

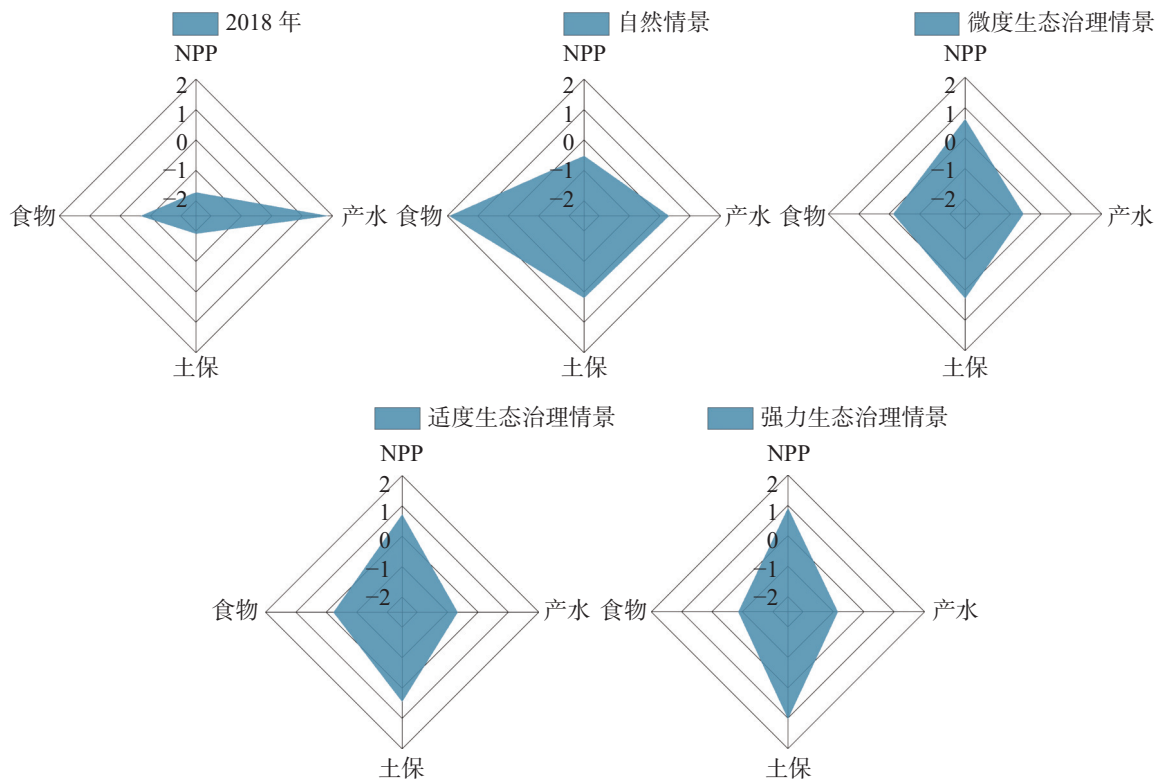


图 6 生态系统服务权衡关系变化

Fig. 6 Trade-off changes of ecosystem services

草稳步推进,但是生态治理措施能否促成生态系统服务双赢的局面仍有待商榷<sup>[41]</sup>。当前喀斯特区生态系统服务评价主要集中于 NPP、产水量和土壤保持量等<sup>[42]</sup>。由于蒙自喀斯特断陷盆地山区贫困人口集中,耕作困难,粮食供给能力对于提高人民福祉,促进区域可持续发展具有重要意义,因此本文也对食物供给量进行了评价与预测。研究发现随着生态治理措施的推进, NPP、土壤保持量不断增加,这说明区域石漠化治理的生态效益十分明显。前人研究也证实生态治理能够促进生态系统的固碳和土壤保持能力<sup>[43]</sup>。但是在相同气候条件下,良好的植被覆盖由于能够截留、吸收降水和具有较多的蒸散量也会限制产水量的增加<sup>[41]</sup>,产水量呈减少趋势。尽管区域耕地面积不断减少,但食物供给量仍然增加。这得益于区域不断进行农业措施改革,调整种植结构。据统计,区域耕地单位面积价值量不断提高,草地、果园的供给价值量也不断增加。但是当耕地大幅度转化为生态用地时,食物供给能力也会受到抑制。这表明生态治理措施的实施一方面会提高 NPP 和土壤保持量,另一方面也会限制产水量和食物供给量。因此,不同土地利用类型相互转变导致生态系统服

务发生变化应当是未来土地管理关注的重点。未来要根据区域生态需求和地理要素特征确定生态治理的目标、范围和途径,全面量化生态系统服务之间的权衡,实现生态系统服务可持续供给<sup>[41]</sup>。

#### 4.1.2 土地利用变化对区域石漠化治理的启示

石漠化一直是制约蒙自喀斯特断陷盆地发展的主要生态问题,虽然自 2006 年起该区域开始实施大规模的石漠化治理工程,但截至到 2016 年区域石漠化发生率仍高达 77.96%,其中重度石漠化发生率达 22%<sup>[40]</sup>。石漠化治理的主要手段就是通过转变土地利用类型,增加植被覆盖度,减少人类对于石漠化地区的再度破坏。土地利用转变的强度和方向必然会对区域生态系统服务产生重要影响<sup>[44]</sup>。上述研究表明大面积的农业用地转化为生态用地,调节服务(NPP、土壤保持量)会得到很大的改善,但是供给服务(产水量、食物供给量)会因此受到限制。因此,石漠化治理过程中不能一味追求生态效益而忽略了基本供给,但也不能因为经济效益而破坏生态系统平衡。情景模拟是研究区域发展政策驱动下土地利用变化对生态系统服务影响的重要方法<sup>[11]</sup>,不同土地

利用情景下生态系统服务及关系变化可为决策者识别生态敏感区域提供重要参考<sup>[41]</sup>。通过情景模拟本文发现自然情景下 NPP 增加对产水量和食物供给量的促进作用最大,但是对于土壤保持量最为不利。另外,该情景下产水量与土壤保持量和食物供给量之间的协调性也最弱。微度生态治理情景最不利于增强 NPP 与产水量及产水量与土壤保持量之间的协调性,但有助于改善土壤保持量与食物供给量之间的关系。强力生态治理情景虽然有利于提高 NPP 与土壤保持量的协调性,但是对于 NPP 与食物供给量之间的协调性抑制性较强。另外,该种措施最不利于促进土壤保持量和食物供给量的协同度。适度生态治理情景下四种服务的协调性介于其他三种服务之间,是未来最为有效的生态治理方式。因此,未来要密切关注坡度 $>20^\circ$ 区域的石漠化治理工作。

## 4.2 结论

(1)2006-2018 年蒙自喀斯特断陷盆地生态用地呈现增加趋势,耕地和裸岩不断减少,反映出石漠化治理过程中土地转换较为合理,石漠化治理成效明显。2030 年随着生态治理强度不断加大,耕地的减少幅度和林地的增加幅度逐渐变大。适度生态治理情景最有利于果园面积的增加;

(2)随着生态治理强度加大,NPP 和土壤保持量不断增加,产水量不断减少。食物供给量在自然演化情景下增加较多,在微度/适度生态治理情景下增加幅度较小,在强力生态治理措施下食物供给量减少。生态治理措施虽然对 NPP 和土壤保持量具有促进作用,但也会在一定程度上限制产水量和食物供给量的增长;

(3)NPP 与产水量和食物供给量为权衡关系,与土壤保持量为协同关系。产水量与土壤保持量为权衡关系,与食物供给量为协同关系,土壤保持量与食物供给量为权衡关系。相关分析和 Z 值标准化表明适度生态治理情景下各种生态系统服务的权衡度介于其他三种情景之间,是较为合理的生态治理方式。坡度 $>20^\circ$ 区域的石漠化治理应当成为关注的重点。

因为资料、数据的限制,本研究还存在一些局限性。后续研究中应当不断提高基础数据精度,例如,利用高分辨率遥感数据代替 Landsat 系列数据以便更加真实地反映地类信息。另外,在情景设置时要充分考虑土地利用变化的影响因子,所选因子

必须要考虑到喀斯特区的特殊性,例如,未来可将地质条件作为土地利用变化的一个重要因子进行考虑。最后也要增强对比研究,不但是方法之间的对比,也应当增强区域之间的对比,以便提出更为有效的对策。

## 参考文献

- [1] Verburg P H, Chen Y, Veldkamp T. Spatial explorations of land use change and grain production in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 82(1-3): 333-354.
- [2] Fu B, Wang S, Su C. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being (MA)*[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] Tian Y, Wang S, Bai X, Luo G, Yan X. Trade-offs among ecosystem services in a typical karst watershed, SW China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 1297-1308.
- [5] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 25(1-2): 49-65.
- [6] Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 385-390.
- [7] Crist P J, Kohley T W, Oakleaf J. Assessing land-use impacts on biodiversity using an expert systems tool[J]. *Landscape Ecology*, 2000, 15(1): 47-62.
- [8] 杜勇, 税伟, 孙晓瑞, 杨海峰, 郑佳瑜. 海湾型城市生态系统服务权衡的情景模拟: 以福建省泉州市为例[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4293-4302.  
DU Yong, SHUI Wei, SUN Xiaorui, YANG Haifeng, ZHENG Jiayu. Scenario simulation of ecosystem service trade-offs in bay cities: A case study in Quanzhou, Fujian Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4293-4302.
- [9] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.  
LI Peng, JIANG Luguang, FENG Zhiming, YU Xiubo. Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services: An overview[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [10] 林媚珍, 刘汉仪, 周汝波, 龚建周. 多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究[J]. *地理研究*, 2021, 40(9): 2657-2669.  
LIN Meizhen, LIU Hanyi, ZHOU Rubo, GONG Jianzhou. Evaluation and trade-offs of ecosystem services in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under multi-scenario simulation[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(9): 2657-2669.
- [11] Shi M, Wu H, Fan X, Jia H, Dong T, He P. Trade-offs and synergies of multiple ecosystem services for different land use scenarios in the Yili river valley, China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(3):



- 1577-1592.
- [12] 梁锦桃, 邓艳, 曹建华, 靳振江, 李旭尧. 典型断陷盆地流域生态系统服务价值时空差异研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 476-486.
- LIANG Jintao, DENG Yan, CAO Jianhua, JIN Zhenjiang, LI Xuyao. Temporal and spatial differentiation of the ecosystem service value in typical fault-depression basins[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 476-486.
- [13] Lang Y, Song W, Zhang Y. Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017, 101: 102-111.
- [14] 吕国屏, 廖承锐, 徐雁南, 张婷, 李海东. 基于CA-Markov模型的喀斯特地区区域生态系统服务价值动态模拟[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 49-56.
- LV Guoping, LIAO Chengrui, XU Yannan, ZHANG Ting, LI Haidong. Dynamic simulation of future ecosystem service value in Puding county, Guizhou Province based on CA-Markov model[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41(5): 49-56.
- [15] 操玥, 王世杰, 白晓永, 李汇文, 陈飞, 王明明, 吴路华, 许燕, 李琴, 田诗琪, 杨钰杰, 李朝君, 胡泽银, 邓元红, 路茜, 习慧鹏, 陈欢, 王金凤, 冉晨, 罗旭玲. 喀斯特槽谷区土壤侵蚀时空演变及未来情景模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6061-6071.
- CAO Yue, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, LI Huiwen, CHEN Fei, WANG Mingming, WU Luhua, XU Yan, LI Qin, TIAN Shiqi, YANG Yujie, LI Chaojun, HU Zeyin, DENG Yuanhong, LU Qian, XI Huipeng, CHEN Huan, WANG Jinfeng, RAN Chen, LUO Xuling. Spatial-temporal evolution processes and simulation of future soil erosion scenario in the karst valley of Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 6061-6071.
- [16] 康彦仁. 云南南洞地下河系统及水资源开发利用[J]. 中国岩溶, 1993, 12(4): 16-27.
- KANG Yanren. Water resource development of Nandong subterranean stream system Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 1993, 12(4): 16-27.
- [17] 王赛男, 蒲俊兵, 李建涛, 张陶, 霍伟杰, 袁道先. 岩溶断陷盆地“盆—山”耦合地形影响下的气候特征及其对石漠化生态恢复的影响探讨[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 50-59.
- WANG Sainan, PU Junbing, LI Jianhong, ZHANG Tao, HUO Weijie, YUAN Daoxian. Climatic characteristics under the influence of basin-mountain coupled topography and its influence on the ecological restoration of rocky desertification in Mengzi karst graben basin, Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 50-59.
- [18] 蓝芙宁, 赵一, 李衍青. 南洞地下河流域水文地质综合调查报告[R]. 2016.
- LAN Funing, ZHAO Yi, LI Yanqing. Hydrogeological survey report of Nandong underground river basin[R]. 2016.
- [19] 彭建, 蔡运龙, P H Verburg. 喀斯特山区土地利用/覆被变化情景模拟[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 64-70.
- PENG Jian, CAI Yunlong, P H Verburg. Simulation of land use/cover change scenarios in karst mountain areas[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 64-70.
- [20] 张丁轩, 付梅臣, 陶金, 胡利哲, 杨晓丽. 基于CLUE-S模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 246-256.
- ZHANG Dingxuan, FU Meichen, TAO Jin, HU Lizhe, YANG Xiaoli. Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(12): 246-256.
- [21] 张盼盼. 喀斯特石漠化景观格局变化及其模拟[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- ZHANG Panpan. Landscape pattern change and simulation of karst rocky desertification[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [22] 朱文泉. 基于GIS和RS的中国植被光利用率估算[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004(8): 694-698.
- ZHU Wenquan. Estimation of light utilization efficiency of vegetation in China based on GIS and RS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004(8): 694-698.
- [23] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007(3): 413-424.
- ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007(3): 413-424.
- [24] 孙小银, 郭洪伟, 廉丽姝, 刘飞, 李宝富. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 669-679.
- SUN Xiaoyin, GUO Hongwei, LIAN Lishu, LIU Fei, LI Baofu. The spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi lake basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 669-679.
- [25] Donohue R J, Roderick M L, Mcvigar T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 436: 35-50.
- [26] Zhou W, Liu G, Pan J, Feng X. Distribution of available soil water capacity in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 3-12.
- [27] Dai Q, Peng X, Yang Z, Zhao L. Runoff and erosion processes on bare slopes in the karst rocky desertification area[J]. *Catena*, 2017, 152: 218-226.
- [28] Gao J, Wang H. Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion: A case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China[J]. *Catena*, 2019, 172: 369-377.
- [29] 胡续礼, 潘剑君, 杨树江, 姜小三, 高天成. 几种降雨侵蚀力模型比较研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(1): 68-70.
- HU Xuli, PAN Jianjun, YANG Shujiang, JIANG Xiaosan, GAO Taicheng. Comparative study on rainfall erosivity models using

- daily rainfall amounts[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(1): 68-70.
- [30] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion sediment yield models[J]. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 53-55.
- [31] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, HUANG Li, ZHANG Guangyuan. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [32] 许月卿, 邵晓梅. 基于GIS和RUSLE的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 67-71.
- XU Yueqing, SHAO Xiaomei. Estimation of soil erosion supported by GIS and RUSLE: A case study of Maotiaohe watershed, Guizhou Province[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(4): 67-71.
- [33] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的水土保持措施因子[J]. *山地学报*, 1999, 16(S1): 22-24.
- YANG Zisheng. The factor of soil and water conservation measures of soil erosion on sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan Province[J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 16(S1): 22-24.
- [34] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王钰. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- LI Shuangcheng, ZHANG Caiyu, LIU Jinlong, ZHU Wenbo, MA Cheng, WANG Yu. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [35] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2162-2172.
- YIN Lichang, WANG Xiaofeng, ZHANG Kun, XIAO Feiyan, CHENG Changwu, ZHANG Xin. Trade-offs and synergy between ecosystem services in National Barrier Zone[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [36] 仲俊涛, 王蓓, 米文宝, 樊新刚, 杨美玲, 杨显明. 农牧交错带禁牧草地生态系统服务空间权衡与协同关系[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 268-275.
- ZHONG Juntao, WANG Bei, MI Wenbao, FAN Xingang, YANG Meiling, YANG Xianming. Spatial trade-offs and synergies of ecosystem services for grazing-prohibited grassland in agro-pasture ecotone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(12): 268-275.
- [37] 郑绍伟, 慕长龙, 陈祖铭, 龚固堂, 黎燕琼. 长江上游森林影响流域水文过程模拟分析[J]. *生态学报*, 2010, 30(11): 3046-3056.
- ZHENG Shaowei, MU Changlong, CHEN Zuming, GONG Gutang, LI Yanqiong. Simulations and analysis on the effects of forest on the hydrological processes in the upper reaches of Yangtze River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 3046-3056.
- [38] 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 317-326.
- CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 317-326.
- [39] Zhang C, Qi X, Wang K, Zhang M, Yue Y. The application of geospatial techniques in monitoring karst vegetation recovery in Southwest China: A review[J]. *Progress in Physical Geography*, 2017, 41(4): 450-477.
- [40] 陈金珂, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 王赛男, 曾锐. 典型岩溶流域不同坡度等级下的土壤侵蚀与石漠化分布特征耦合分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 1-9.
- CHEN Jinke, PU Junbing, LI Jianhong, ZHANG Tao, WANG Sainan, ZENG Rui. Coupling of rocky desertification distribution and soil erosion under different slope grades in a typical karst basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 1-9.
- [41] Peng J, Hu X, Wang X, Meersmans J, Liu Y, Qiu S. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in northwestern Yunnan, China[J]. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100998.
- [42] 韩会庆, 苏志华. 喀斯特生态系统服务研究进展与展望[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 352-358.
- HAN Huiqing, SU Zhihua. Research progress and prospects of karst ecosystem services[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 352-358.
- [43] Wang J, Peng J, Zhao M, Liu Y, Chen Y. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in north-western Yunnan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 57-64.
- [44] Jia X, Fu B, Feng X, Hou G, Yu L, Wang X. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in northern Shanxi, China[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 43(1): 103-113.

## Trade-off and synergy of ecosystem services of a karst critical zone based on land use scenario simulation: Take Mengzi karst graben basin as a study case

CHEN Jinke<sup>1,3</sup>, PU Junbing<sup>2</sup>, LI Jianhong<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>

( 1. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Wetland Science Research of the Upper Reaches of the Yangtze River /Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3. Southwest University School of Geographical Sciences, Chongqing Key Laboratory of Karst Environmental Science, Chongqing 400715, China )

**Abstract** The karst critical zone is the near-surface layer of the Earth including vegetation, soil, water, and rocks in the karst area. It is sensitive to the changes of external environment due to the karst power provided by the Five Circles. And the karst critical zone has been regarded as one of the important ecological barrier areas in China. It is very necessary to study the ecological environment in the zone. Therefore, taking the Mengzi karst graben basin (MKGB) as a case, this study hopes to provide some suggestions for ecological governance in the karst critical zone.

MKGB is located in the southeast of Honghe Hani-Yi Autonomous Prefecture in Yunnan Province. Its boundary is almost consistent with the third-largest karst underground river system (the Nandong underground river watershed) in South China. With the influence of natural and human activities, karst rocky desertification is severe in this area. The forest is mainly composed of artificial forest, secondary forest and shrub forest. The ecosystem is imbalanced and the capability of ecosystem services has been reducing. At present, China has launched the project to control rocky desertification, and the main way is to return farmland to forest or grassland. Previous studies have also shown that optimizing land use mode can achieve win-win results between ecological environment and human benefits. However, the pattern and intensity of land use change is unclear in the control of rock desertification. It will be difficult to make reasonable policies for ecological protection if the problem is not paid more attention to. Ecosystem services and the relationship (trade-off and synergy) are important indicators to measure the structure of ecosystem. Therefore, we quantitatively analyzed the current status of ecosystem services and simulated the land use change to maximize ecosystem services in MKGB. In this study, we evaluated regional Net Primary Productivity (NPP), water yield, soil retention of covered and bare karst areas and food supply by respectively using Carnegie-Ames Stanford Approach (CASA model), Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST model), the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE model) and food supply model. Besides, in order to find the optimal land use mode, we also set up four scenarios—natural scenario, mild ecological governance scenario, moderate ecological governance scenario and strong ecological governance scenario—by the Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent (CLUE-S model). Then we explored the impacts of different ecological governance scenarios on ecosystem services and their tradeoff or synergistic characteristics.

Results show that ecological land use experienced an increasing trend from 2006 to 2018, which reflected that the land conversion was reasonable in the process of rock desertification control, and the effect of rock desertification control was obvious. In 2030, the continuous strengthening of ecological governance will contribute to the increase of forest land and the decrease of cultivated land. Secondly, NPP, water yield, soil retention of covered and bare karst areas and food supply increased by 13.98%, 38.97%, 23.04%, 25% and 105.43%, respectively in MKGB, and there were certain spatial differences in the changes of various services in 2018. Thirdly, with the implementation of ecological governance measures, NPP and soil retention will show an increasing trend, but water yield will decrease continuously in 2030. The food supply will decrease in the strong ecological governance scenario, but increase in the other three scenarios. This result demonstrates that ecological governance measures can promote NPP and soil retention, but they will also limit the growth of water yield and food supply to some extent. Fourthly, NPP presents a



trade-off relationship with water yield and food supply, and a synergic relationship with soil retention. Water yield shows a trade-off relationship with soil retention, and a synergic relationship with food supply. Soil retention and food supply are in a trade-off relationship. Finally, compared with the situation in 2018, the degree of trade-off in the moderate ecological governance scenario is acceptable, implying that it will be a reasonable ecological governance.

Therefore, we should pay close attention to the control of rocky desertification in the areas with the slope  $> 20^\circ$  in the future. We believe the conclusions of this study can provide a clear direction for the control of rocky desertification. However, there still exist limitations. For example, the accuracy of basic data should be continuously improved, and more factors affecting the ecosystem services should also be taken into account in future studies.

**Key words** rocky desertification, ecosystem, CLUE-S model, trade-off and synergy, karst graben basin

(编辑 黄晨晖)

(上接第 70 页)

and limitations. The simulated runoff plot method can quickly and intuitively monitor the soil leakage at a small spatial and temporal scale. However, its result is highly sensitive to external environmental factors such as rainfall and physical and chemical properties of soil. The cave drip method can only trace the soil loss that occurs by cave dropping water, which is quite different from the actual loss in the cave catchment. However, as a new leakage research method, it provides a new idea for leakage monitoring. The determination of soil leakage at watershed scale mainly includes model method and fingerprinting identification method. The traditional model method can directly monitor the leakage at the watershed scale, but there are some limitations in practice. First of all, the traditional method requires clear underground runoff outlet in the basin and no exchange and superposition between underground runoff and surface runoff. Secondly, it is requested that the surface and underground sediment production and drainage only occur in the basin without the disturbance by other basins. Thirdly, for the traditional model method, the underground or surface runoff sediment discharge should be monitored at fixed points, and the accuracy of sediment amount is greatly affected by the location of monitoring point and monitoring time. To some extent, fingerprinting identification method can be used to solve some problems of traditional model method, but it also has some limitations such as the selection of sediment sources, the screening of fingerprinting factors and the correction of retention of them. In this paper, the future study focuses on soil leakage in karst area are also pointed out by analyzing the problems of research on soil leakage. The collation of quantitative research on soil leakage in karst area provides a reference for exploring the driving mechanism of soil leakage and for further studying the coupling relation between soil leakage and environmental factors.

**Key words** karst area, soil leakage, quantitative study, influencing factor

(编辑 张玲 杨杨)