

曾锐,张陶,蒲俊兵,等.典型岩溶断陷盆地农作物生态需水研究:以蒙自地区为例[J].中国岩溶,2020,39(6):873-882.
DOI:10.11932/karst20200608

典型岩溶断陷盆地农作物生态需水研究 ——以蒙自地区为例

曾锐^{1,2},张陶²,蒲俊兵²,李建鸿²,王赛男^{1,2}

(1. 重庆市岩溶环境学重点实验室/西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 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)

摘要:从合理调控生态用水角度出发,探讨典型岩溶断陷盆地农作物生态需水问题。根据蒙自断陷盆地的岩溶地貌特征,分别选取位于盆地、坡面和高原面的大洼子、朵古、牛耳坡3个观测点,利用Penman-Monteith公式、作物系数(FAO推荐)及同期有效降雨量,估算3个观测点2018年的参考蒸散量、生态需水量以及不同作物生长所需的人工灌溉水量。结果表明:(1)大洼子、朵古及牛耳坡的参考蒸散量分别为1 346.10 mm、1 200.00 mm、1 064.30 mm,远大于同期降水量,均呈现出蒸发旺盛的特点,加大了作物对于水分的需求;同时三者的参考蒸散量表现出较为明显的时空差异,使得3个观测点的农业种植条件存在差异;(2)大洼子种植的水稻、小麦、花生、油菜、大豆、马铃薯、葡萄等作物的生态需水定额均远大于大洼子同期的有效降水,在大洼子种植的作物均需要大量人工浇灌才能正常生长,而农作物的种植与其种植条件匹配度不高;(3)朵古及牛耳坡种植的玉米、万寿菊的生态需水定额与同期有效降水之间的差值较小甚至完全满足,表明玉米、万寿菊在高原山区的种植是与当地种植条件相匹配的;而种植在朵古及牛耳坡的苹果、烤烟的生态需水定额与同期有效降水之间的差值较大,表明在高原山区大量种植苹果及烤烟对于人工浇灌要求较高;(4)研究区大部分农作物在生长发育阶段内所需的水分主要依靠人工灌溉,与本地降水分布规律匹配度不高,区内农业结构与种植模式有待调整。在岩溶断陷盆地内要种植耗水较少,对热量要求较高的作物,山区则需要发展具有生态保护和经济效益的作物,但种植的重点区域仍是盆地区。

关键词:石漠化;参考蒸散量;作物系数;生态需水

中图分类号:X171 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)06-0873-10 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

生态需水研究是实现水资源合理开发和优化配置的基础性工作,也是维持和改善生态系统的根本保障,其目前已成为国内外广泛关注的热点问题^[1]。生态需水,广义是指维持全球生物地理生态系统水分平衡所需要的水,狭义是指维护生态环境不再恶化并逐渐改善所需要消耗的水资源总量^[2]。国外对生态需水的研究始于20世纪40年代,河道枯水流量

的提出是其开端^[3],其用于表示河流在长期干旱环境中,河道内能够保存的水流流量。随后针对水域系统生物多样性的问题相继提出河流最小流量^[4]、生态可接受流量^[5]等概念。到20世纪80年代初期,生态需水在美国、澳大利亚、南非、法国等国进行深入探讨,系统地开展了关于鱼类生长繁殖、产量和河流流量关系的研究,形成生态和环境需水分配的雏形,并开创了一系列方法运用于河道生态需水的计算^[6-7]。21世纪以来,生态环境需水问题正式在全球范围内

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502501);广西自然科学基金项目(2017GXNSFFA198006)

第一作者简介:曾锐(1995—),女,硕士研究生,研究方向:岩溶环境与全球变化。E-mail:15228720535@163.com。

通信作者:张陶(1989—),男,博士,助理研究员,研究方向:岩溶环境、岩溶水文地球化学等。E-mail:zhangtao@karst.ac.cn。

收稿日期:2020-02-15

引起关注,对其相关问题的研究在深度和广度上都得到了丰富,研究重心由河道内生态需水转向河道外生态需水,如利用模型对农田生态系统^[8]、湿地生态系统^[9]以及森林生态系统^[10]等进行预测评价,以优化水资源的配置。总体来说,国外关于生态需水的研究主要集中在河流生态需水,对河道内生态需水的研究较为成熟,从20世纪90年代开始逐步扩展到河道外生态系统,而对其生态需水的研究还没有形成完整体系。

国内有关生态需水的研究相对较晚,20世纪60年代在对河西走廊地下水评价时提出了生态用水的“水量消耗”这一名词,到20世纪70年代末中国才开始探讨河流最小流量问题,而后在分析塔里木盆地水资源与绿洲建设时由汤奇成率先提出了生态用水的概念,从而正式开始了中国对生态需水的研究序幕^[11]。进入21世纪,随着人口增加与经济的快速发展,中国面临的生态环境问题日益凸显,其中人与自然就水资源分配问题得到政府重视,中国水利部也正式提出,在水资源配置中要考虑到生态需水^[12]。此后,生态需水研究蓬勃发展起来,一些学者从不同角度阐释生态需水的概念,解析出空间尺度的广义与狭义生态需水^[2],用水功能上的生态需水、环境需水^[13],生态需要与实际用水上的生态用水、环境用水以及根据生态系统的类型划分的水域和陆地生态用水等^[14-15],而另一些学者则采用不同方法对生态脆弱区的生态需水进行了估算与研究^[16-22]。总之,国内生态需水的研究主要着眼于干旱半干旱区域且重点针对河道外植被生态系统,特别是对西北干旱区植被生态需水的估算,其认为植被生态需水是指为保障植被能正常生长、发育或植被生态系统维持健康并发挥正常生态系统服务功能而需要消耗的最低水量,这被认为是退化生态系统恢复与重建的关键^[23-25]。

在中国西南地区,由于特殊的岩溶地貌,水土流失、漏失现象严重,地表水缺乏,地下水利用难度大,存在特有的岩溶干旱及石漠化等生态环境问题,而生态缺水问题突出,严重影响了区域生态系统的完整和健康。但这一严峻的生态环境问题在产生之初没有得到足够重视,导致西南地区生态需水研究相对薄弱。目前仅有少部分学者有所关注,如周晓东^[26]利用改进后的Penman-Monteith公式评估云南小江流域的生态需水总量;王岳川、侯琨等^[27-29]利用面积定额法和Montana法估算了桂林桃花江河道需水

量;吴建强等^[30-31]以广西峰丛洼地区域为研究对象,基于遥感和GIS技术,结合气象站实测资料,应用Penman-Monteith法和ArcGIS软件模拟研究区域生态需水的空间分布,估算岩溶区域典型植物群落不同季节的植被生态需水及生态缺水定额,并分析其主要影响因素;李坤峰^[32]估算了重庆南川地区农田生态系统生态需水量。但以上研究各自针对不同的研究对象,采用不同的计算方法且基数较小,难以形成对比,对生产生活的指导意义较小。为更好解决中国西南岩溶区严峻的水资源问题,本文以云南蒙自岩溶断陷石漠化地区的大洼子、朵古、牛耳坡村为例,以农作物为研究对象,分析该区域农作物的生态需水现状及对策,探讨在生态脆弱的岩溶地区,如何协调人口、资源、环境与发展之间的关系,处理好开发与保护、人口与资源以及可持续发展的关系,以期制订岩溶石漠化地区水资源可持续利用政策和规划社会经济的可持续发展提供参考依据。

1 研究区概况

蒙自岩溶断陷盆地位于云南东南部,是新生代高原隆升引起的断陷差异及侵蚀和溶蚀共同作用形成的山间盆地^[33],其地形可分为三类:山地岩溶区(高原面)、平坦岩溶盆地(盆地)和过渡带(坡面)^[34],大致呈南北走向,盆地(平均海拔为1 250 m)和高原面(平均海拔为2 200 m)的海拔差异明显^[34-35];由盆地—中山构成地貌单元,山区面积占总面积的75.6%,盆地面积占总面积的24.4%,且大部分处于南洞地下河流域内,地表无常年性河流,盆地内多为第三系、第四系沉积物,种植多种作物;周边中山山区残存古高原面,岩性以三叠系个旧组碳酸盐岩为主^[34],岩溶十分发育,石漠化典型,生境脆弱;北回归线从境内穿过,属亚热带季风气候,具有高原立体气候特征^[35],年平均气温为18.6℃,极端最高气温为33.8℃,极端最低气温为2.9℃,无霜期有337 d,年降雨量为815.8 mm,年均日照时数为2 234 h,作物生长的气候条件较为优越,主要种植小麦、水稻、玉米、大豆、花生、万寿菊、油菜、烤烟以及苹果^[36],但区内的雨水多通过石沟、石缝和岩土界面快速渗漏,地表持水困难^[33],给农作物的生长带来不利影响。为更好了解蒙自岩溶断陷盆地农作物需水的特征,本研究分别选择盆地、坡面、岩溶高原面3个观测点,收集观测点的气象参数,调查周边主要种植作物等信息(表1,图1)。

表 1 研究区观测点基本信息表

Table 1 Basic information of observation sites in the study area

观测点	地貌部位	经度	纬度	海拔	生境
大洼子	盆地	E103°23'47"	N23°28'22"	1 363 m	撂荒地,周边多种植葡萄、火龙果等作物
朵古村	坡面	E103°26'13"	N23°27'43"	1 846 m	果园地,周边种植玉米、万寿菊等作物
牛耳坡	高原面	E103°27'09"	N23°27'08"	2 086 m	果园地,周边种植三七、玉米、万寿菊

注:3个观测点除海拔高度存在明显差异外,均为岩溶石漠化地区。

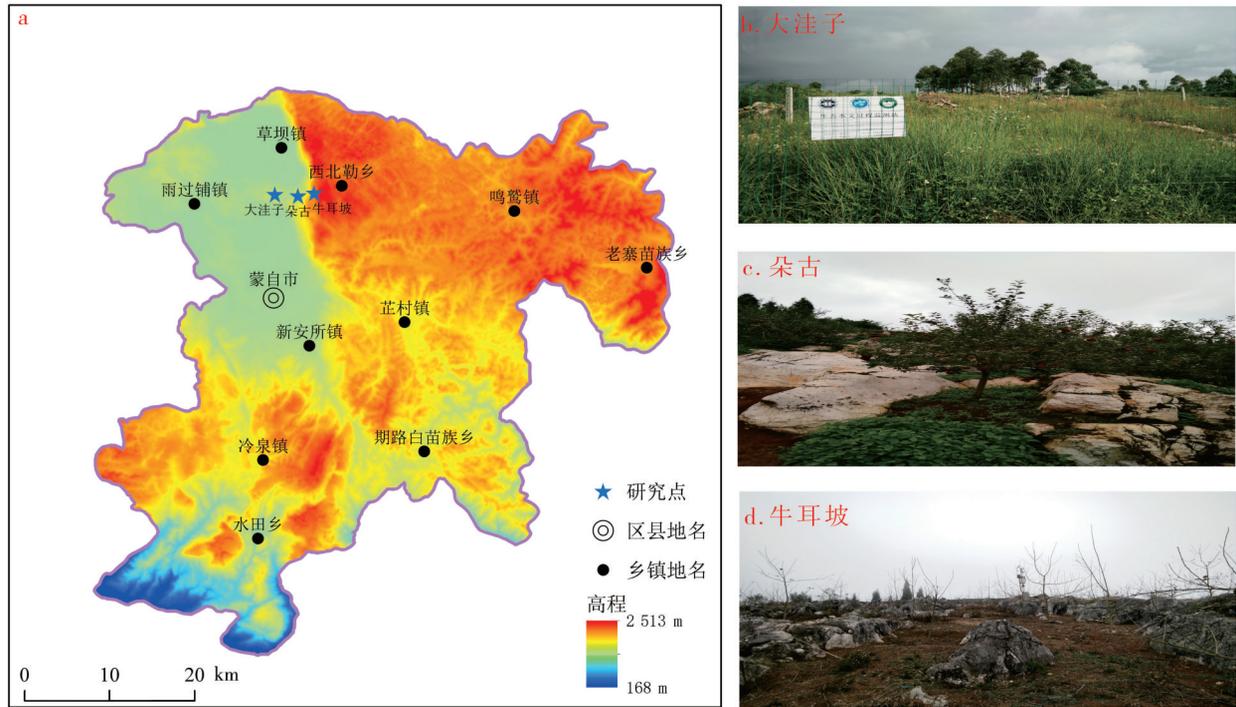


图 1 研究区观测点分布区位图

Fig. 1 Distribution of observation sites in the study area

2 研究方法

2.1 农作物生态需水概念

植被生态需水的估算一般是将农作物与天然植被当做一个整体进行估算,但对于农田这样一个特定的与人类关系最为密切的生态系统,受人类生产活动干预较强,旱时灌溉,涝时排洪^[32],与天然植被生长有所不同,需将人类浇灌水量纳入考量之中,因而本文将研究区几个观测点处的农作物作为研究对象,对其进行生态需水的估算。由于本区农作物多为浅根系作物^[36],且地下水埋藏较深^[33],农作物的水分补给主要来自降水和人工浇灌。因此,结合植被生态需水概念^[23-25],农作物生态需水是指在正常的环境条件下,农作物生长发育成熟所需要的降水及人工灌溉水量之和,意味着农作物在降水达到所需水量时不需要人工浇灌,当降水少于该水量时则根据

差值补充灌溉。

2.2 区内农作物种植情况

依据 2018 年云南省和蒙自县统计信息^[36],研究区内农作物主要有水稻、小麦、玉米、高粱、豆类、薯类等粮食作物和油料、烟叶、蔬菜、瓜果、中药材等经济作物。其中,豆类主要为大豆、蚕豆等,薯类主要有马铃薯,油料作物以花生和油菜为主,烟叶多为烤烟,瓜果主要有苹果、葡萄、火龙果,药材则以三七种植为主。实地调查发现盆地大洼子主要分布有水稻、小麦等粮食作物及少量经济作物,如葡萄、油菜、花生等,朵古和牛耳坡则主要种植万寿菊和苹果等经济作物,烤烟、玉米等也主要分布在此处。

2.3 生态需水计算方法

计算农作物生态需水主要采用世界粮农组织 (FAO) 推荐使用的公式^[37]:

$$ET = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

式中: ET 为作物生态需水定额, mm; ET_0 为作物参考蒸散量, mm; 通常采用目前计算参考蒸散量的标准方法 Penman-Monteith 公式^[38-41]进行计算; K_c 为作物系

数, 是农作物实际蒸散与参考蒸散的比值, 它修正了实际种植作物与参照作物在作物高度、冠层阻力、地表反射率等方面的差异^[42], 一般可参考 FAO-56 附表^[37](表2)。

表2 蒙自常见农作物植被系数(K_c)

Table 2 Vegetation coefficients (K_c) of common crops in Mengzi

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
水稻					0.35	0.93	1.10	0.91	0.42			
小麦	0.76	0.94	1.11	1.15	0.59					0.30	0.39	0.58
玉米			0.31	0.76	1.19	1.11	0.66					
大豆						0.45	0.99	1.15	1.10	0.68		
马铃薯		0.51	0.93	1.15	1.06	0.81						
花生			0.41	0.84	1.15	1.09	0.75					
油菜		0.63	1.10	1.01	0.82					0.31	0.34	0.52
烤烟			0.54	1.01	1.13	0.91						
苹果	0.45	0.45	0.70	0.95	0.70	0.70	0.95	0.70	0.70	0.95	0.70	0.45
葡萄	0.84	0.62	0.42	0.40	0.40	0.40	0.40	0.54	0.79	0.85	0.85	0.85
万寿菊				0.35	0.36	1.15	1.15	1.15	0.35			

注: 有 K_c 值的月份为该农作物的生长发育阶段。

(1) 参考蒸散

Penman-Monteith 公式:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \beta \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \beta(1 + 0.34\mu_2)} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考蒸散量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; Δ 为饱和水汽压对温度曲线的斜率, $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$; R_n 为作物表面净辐射, $\text{MJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; G 为土壤热通量, $\text{MJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 可忽略; T 为2 m 高度平均日气温, C ; μ_2 为2 m 高度处风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; e_s 为饱和蒸汽压, kPa ; e_a 为实际水汽压, kPa ; β 为干湿表常数, $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ 。上述公式由于参数较多, 计算较为复杂, 通常使用 ET0 软件^[43]辅助进行计算, 所需气象数据均可直接从研究区观测点处气象站获取。

(2) 农作物植被系数 K_c

由于植被系数多是通过实验获得^[22], 平时获取较为困难, 本文采用 FAO-56 提供的参考值作为研究基础, 但 FAO-56 所提供的经验值中暂未记载万寿菊的作物系数经验值, 因此本文选用与万寿菊同为花草类且研究区中有少量分布的向日葵的植被系数经验值参与计算。

(3) 灌溉水量

利用公式(1)得到的作物生态需水量是作物生

长所必需的水量, 这部分水量一部分靠降水供给, 另一部分靠灌溉供给。一般来说, 同期降水量直接影响农作物的生长发育状况, 灌溉通常只作为辅助手段, 但灌溉这一行为与人类关系最为紧密, 因此有必要利用研究区各农作物的生态需水量和同期降水量来估算人工灌溉所需的水量, 其计算公式如下:

$$Q = ET - P_e \quad (3)$$

式中: Q 为人工灌溉所需水量, mm ; ET 为农作物生态需水定额, mm 。由公式(1)得到, P_e 为有效降水量(mm), 一般认为, 植被生长所需的水分几乎全部来自于土壤之中^[19], 而在本研究区土壤水的补给是由降水完成的^[33]。但一次降水并不会全部入渗到土壤之中, 在入渗之前, 会因受到植被冠层截留, 空气蒸发等有所消耗, 到达地面后, 也会因地面草被覆盖以及土壤质地等下渗有所不同^[37]。因此, 考虑到降水并不会完全补给到土壤之中, 对研究区的有效降水量 P_e 进行计算是十分必要的, 其计算公式如下:

$$P_e = \alpha \times P \quad (4)$$

式中: α 为降水入渗系数, 当降水量大于 50 mm 时, $\alpha = 0.7 \sim 0.8$, 本文取 0.75; 当降水量小于 5 mm 时, $\alpha = 0$; 当降水量在 5~50 mm 之间时, $\alpha = 1$ ^[40]; P 为月降水量, mm 。由于研究区3个监测点的降水频率差异不大, 均以小降水事件为主^[44], 加之观测点均处于岩溶石

漠化地区,生境类似,故在 3 个观测点采用一致的降水入渗系数标准参与计算。

3 结果与分析

3.1 参考蒸散量

3 个站点 2018 年各月参考蒸散量及年总参考蒸散量如图 2 所示:大洼子、朵古、牛耳坡的参考蒸散总量分别为 1 346. 10 mm、1 200. 00 mm、1 064. 30 mm,

且 3 个站点的蒸散量在时间上呈现出明显的季节变化,即春季(3-5 月)蒸散量最大,其余季节蒸散量较为均衡,最低值均出现在冬季(12 月),这一蒸散量的季节变化规律与王赛男等^[44]结果一致,表明研究区容易出现“春旱”灾害,这对于当地农作物生长不利。从空间上来说,3 个站点中大洼子的蒸散量呈现出比其他 2 个站点更高的现象,仅在 8 月其蒸散量稍低于牛耳坡,三者之间大致呈现为大洼子>朵古>牛耳坡的现象。

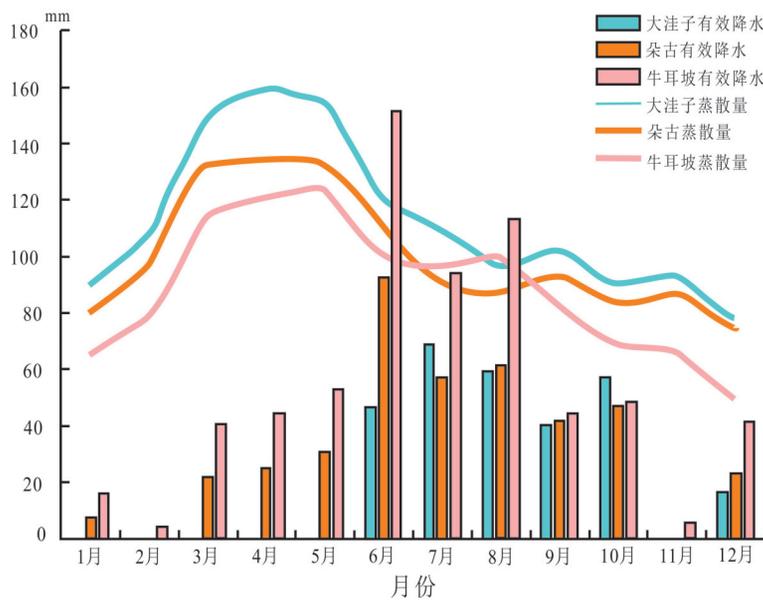


图 2 监测点各月蒸散及同期有效降水量

Fig. 2 Monthly evapotranspiration and effective precipitation at monitoring sites

3.2 有效降水量

利用 Excel 分类汇总统计了 2018 年大洼子、朵古、牛耳坡的月降水,分别为 373. 00 mm、483. 00 mm、829. 80 mm,处于盆地的大洼子降水量远小于位于山区的两个站点的降水,体现出典型的降水随海拔升高而增加的山地立体气候特点。同时大洼子、朵古、牛耳坡降水的逐月变异系数呈现出大洼子(117. 59%)>朵古(92. 00%)>牛耳坡(88. 31%)的现象,表明三者年内降水时间分配不均匀,但牛耳坡降水的离散程度要弱于朵古和大洼子,这一点可通过图 2 中同期有效降水量得到验证:大洼子村 1-5 月几乎没有有效降水,6-10 月有效降水明显,与牛耳坡全年每月均有有效降水对比明显。此外,通过 3 个站点月蒸散量与同期有效降水量的对比发现,3 个站点均处于较为干旱的气候环境中,朵古和大洼子的全年每月蒸散消耗的水量远大于降水的补给,导致本

区长期处于干旱缺水状态。

3.3 各类农作物生态需水定额

根据公式(1)、公式(4)得出大洼子、朵古、牛耳坡不同类型农作物在各自生长期间的生态需水定额和同期有效降水量(表 3,图 3),从中可发现本区内所种植农作物的需水若仅依靠降水几乎不能得到有效保证,需要补充灌溉,表明位于蒙自东山的 3 个观测点的降水现状对于农作物生长不利。但朵古和牛耳坡的玉米种植所需要的人工灌溉水量相对较少,这表明玉米是一种能够适应石漠化地区的作物^[45]。同时,各农作物间的生态需水定额差异也较大,同样种植在大洼子的小麦与水稻之间差值达到 316. 01 mm,这表明不同农作物对于生境的要求差异较大,在调整地区种植结构时,不同作物的特性须纳入考虑。

表3 各农作物生长生态需水定额及同期有效降水量(mm)

Table 3 Ecological water requirements quota and effective precipitation for crop growth in the same period (mm)

地点	农作物	生态需水定额/mm	同期有效降水量/mm	灌溉水量/mm
大洼子	水稻	415.49	215.10	-200.39
	小麦	731.50	74.15	-657.35
	花生	584.99	115.05	-469.94
	油菜	672.13	74.15	-597.98
	大豆	445.26	272.25	-173.01
	马铃薯	637.00	46.65	-590.35
	葡萄	774.79	289.25	-485.54
朵古	玉米	479.48	228.23	-251.26
牛耳坡		447.63	384.70	-62.93
朵古	烤烟	454.21	171.00	-283.21
牛耳坡		413.35	290.35	-123.00
朵古	万寿菊	485.27	171.00	-314.27
牛耳坡		435.27	295.35	-139.92
朵古	苹果	698.41	410.75	-287.66
牛耳坡		603.26	661.00	57.74

注:负值为需水缺口,需要补充灌溉。

大洼子地区由于有效降水量过少,而蒸散量又较大,因此在此生长的农作物的水分主要来自人工灌溉。从图3a中发现:种植在大洼子地区的小麦、花生、油菜、马铃薯在其各自生长期内所需水量大部分来自人工灌溉,仅有水稻、大豆的生态需水在一定程度上能得到降水补给,这主要与农作物生长期相关。本区小麦属于冬小麦,每年10月开始种植,次年5月收获,在此期间,大洼子正好处于旱季,有效降水量极度缺乏,甚至大多数月份完全没有有效降水补给作物。同样,马铃薯、油菜、花生等作物的生长期也刚好与大洼子旱季时间一致,意味着在此期间生长的作物的需水量均需要人为进行补给。而大洼子种植的水稻和大豆的生长期为5-10月,与本区雨季时间重合,使得这两种作物每月均可得到雨水补给,从而减少了人工灌溉所需水量。

与大洼子的情况相反,朵古和牛耳坡生长的大部分农作物的生长期在3-9月,正好处于本区雨季,同时朵古及牛耳坡的年降水在时间分配上要优于大洼子,种植于朵古及牛耳坡的各类农作物在其生长期能够得到降水的补给,尽管大部分农作物所需水量与同期有效降水量相比,仍有较大差距,但相对来说其种植条件在一定程度上要优于大洼子(图3b)。朵古和牛耳坡种植的玉米的生态需水量分别是479.00 mm和447.00 mm,而同期有效降水量就分

别达到了228.00 mm和384.00 mm,说明牛耳坡降水满足了玉米需水的绝大部分,仅需要少量灌溉即可。种植在牛耳坡的万寿菊其生态需水总量为454.00 mm,而同期有效降水总量为502.00 mm,意味着种植在牛耳坡的万寿菊几乎可以实现降水补给而不依靠人为灌溉。

4 讨论

参考蒸散发这一因子的变化往往是同各气象要素联系在一起的,特别是地面所接受的太阳辐射总量往往是影响潜在蒸散的主导因子^[46-48]。因此,对研究区参考蒸散量以及参与计算的各气候要素采用单因子分析法^[30],以得到影响参考蒸散量的主导气候因子(表4)。从表4中可发现气温、湿度、太阳辐射、风速等均与参考蒸散量之间存在相关关系,尽管不同的地点各因子与参考蒸散之间的相关性程度不同,但大致表现为气温、风速、太阳辐射与参考蒸散量之间呈正相关关系,而湿度则与之呈负相关关系,特别是太阳辐射在各个气象站均表现出相关性最强的这一特点,表明太阳辐射是影响该地区潜在蒸散的主导因素,这一成果与前人研究结果一致。云南省蒙自地区属于太阳能资源丰富地区,大洼子年太阳辐射总量比朵古和牛耳坡更丰富^[44],这一原因使



图 3 各农作物生长阶段需水量及同期有效降水量对比

Fig. 3 Comparison of water requirements and effective precipitation during each stage of crop growth

得大洼子的年参考蒸散量高于朵古和牛耳坡。另外,3个观测点的太阳辐射量的年内变化趋势较为一致,均是春季(3-5月)最大,冬季(12-2月)最小^[46],这一规律与3个观测点参考蒸散量春季最高,冬季最低的现象对应,证明了太阳辐射对于蒙自地区参考蒸散量的巨大影响。综上所述,蒙自岩溶断陷盆地所呈现出的参考蒸散的时空变动主要是受到区内太阳辐射的时空分布影响。

表4 不同地点各气象要素与蒸散量之间的相关关系
Table 4 Correlation between meteorological factors and evapotranspiration at different locations

地点	指标	大洼子	朵古	牛耳坡
	平均气温	0.45	0.35	0.62
	平均湿度	-0.64	-0.57	-0.43
相关关系	平均风速	0.70	0.49	0.73
	平均太阳总辐射	0.91	0.93	0.81
	月蒸散量	1.00	1.00	1.00

从植物生长的需水量及同期有效降水量来看,牛耳坡的作物种植条件最优,朵古次之,大洼子最差,但这并不意味着山区相较于盆地更适宜种植作物,原因在于蒙自地区是典型的高原立体气候^[35],山区和坝区的气候特征具有很大差别。大洼子地处盆地,海拔为1 363 m,朵古和牛耳坡都位于大庄一草坝—蒙自高原面东山区,海拔均在1 800 m以上,研究表明大洼子年太阳总辐射和年均温均高于朵古和牛耳坡,但牛耳坡年降水量(1 027.40 mm)大于大洼子(662.60 mm)。本文中生态需水量的控制因素是参考蒸散量和植被系数,但植被系数作为一个比例性常数,通常不加入讨论,故不同地区生态需水量的差异主要受到该地区参考蒸散量的影响。如前所述,参考蒸散量和太阳辐射、气温之间具有很明显的正相关关系,对于同一农作物来说,太阳辐射强,气温高的大洼子地区其生态需水定额会高于朵古和牛耳坡,即大洼子的农作物耗水会比朵古及牛耳坡更多。其次,对于不同物种来说,3个观测点降水的季节分配差异导致了它们种植条件的差异。大洼子主要种植水稻、小麦、花生、油菜、葡萄等,这些农作物的生长期集中在1-5月,而同期大洼子的有效降水几乎都为零,无法满足作物生长期的蒸散需水量,与此相反,朵古和牛耳坡种植的作物需水期集中在3-6月,牛耳坡年降水量大于大洼子,且年降水季节分配较

大洼子均匀,因而牛耳坡同期有效降水量大多可以

5 结论与建议

5.1 结论

(1)蒙自岩溶断陷盆地内大洼子、朵古、牛耳坡的参考蒸散量表现出明显的时空差异,3个研究区均呈现出春季(3-5月)蒸散旺盛的特点且大洼子的年平均蒸散量最高;

(2)大洼子、朵古、牛耳坡年内降水时间分配不均匀且空间差异较大,但牛耳坡降水的时间分配优于朵古和大洼子;三者均处于较为干旱的气候环境中,尤其是朵古及大洼子全年每月蒸散消耗的水量远大于降水的补给;

(3)大洼子、朵古、牛耳坡3个观测点所种植的不同类型农作物在各自生长期内的生态需水定额差别较大,且大部分作物生态需水量与同期有效降水量差值较大,需要人工灌溉才能维持正常生长。

5.2 建议

(1)协调经济发展与生态保护的关系。山区作为水土流失、石漠化的高发区,保持水土是其首要任务,尽管蒙自断陷盆地山区种植优势明显,但从长远出发,还是要减少山区的农耕地,避免深耕翻作。研究区内的山区适合种植垦殖频率较低、对人工管理要求较小的作物,例如,苹果、橘子、李子等果树及像万寿菊这一类经济作物;在盆地则要种植耗水少,灌溉少,对太阳辐射和热量要求较高的作物,如大豆;

(2)因地制宜解决实际问题。摸清各区域的水资源现状、农业用水总量,适当增减各区域作物灌溉面积,提高灌溉用水的效率和精度。根据区域情况选择农田作物,这样既能够保障农作物种类不单一又能最大化的发挥当地优势,发展特色农业,提高农业产值;

(3)石漠化是国家目前治理的重难点生态问题,因此本研究区的任何行为都要以能够遏制生态环境恶化,同时能为该地区带来一定的经济和社会效益为出发点。合理的水资源分配模式对该区的可持续发展是非常必要的,因此需要改革农业结构,多推广滴管等节水措施,适当调整农田结构以及种植模式,提高农业种植的科学性、技术性。

参考文献

- [1] 张丽. 基于生态的流域水资源承载力研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [2] 钱正英, 张兴斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告——中国工程院“21世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组[J]. 中国工程科学, 2000, 2(8): 1-17.
- [3] Smakthin V U. Low flow hydrology: a review [J]. Journal of Hydrology, 2001(240): 147-186.
- [4] 宋进喜, 王伯铎. 生态环境需水与用水概念辨析[J]. 西北大学学报, 2006, 36(1): 154-156.
- [5] POIRA. Flow duration and low flow frequency analyses for selected watersheds in the Atlantic Provinces [R]. Canada: Inland Water Directorate, Atlantic Region, Water Resources Branch, 1985: 80-85.
- [6] Petts G E. Water allocation to protect river ecosystems [J]. Regulated River: Research & Management, 1996, 12: 353-356.
- [7] Gleick P H. Water in crisis: Paths to Sustainable Water Use [J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 571-579.
- [8] Gunter Wriedt, Marijn Vander Velde, Alberto Aloe. Estimating irrigation water requirements in Europe [J]. Journal of Hydrology, 2009, 373: 527-544.
- [9] M L M Graymore, D Mc Bride. Socio-ecological value of wetlands: the dilemma of balancing human and ecological water needs [J]. Australasian Journal of Environmental Management, 2013, 20 (3): 225-241.
- [10] Gert Everaert, Ine S Pauwels, Pieter Boets. Model-based evaluation of ecological bank design and management in the scope of the European water framework directive [J]. Ecological Engineering, 2013, 53: 144-152.
- [11] 汤奇成. 塔里木盆地水资源和绿洲建设[J]. 自然资源, 1989, (6): 28-34.
- [12] 孙雅琦. 黑河下游生态需水及生态调度研究[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [13] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 626-633.
- [14] 符静. 南方湿润区植被生态需水量估算及其时空分异特征研究: 以湖南省为例[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2018.
- [15] 张丽, 董增川, 丁大发. 生态需水研究进展及存在问题[J]. 中国农村水利水电, 2003(1): 13-15.
- [16] 贾宝全. 干旱区生态用水的概念和分类: 以新疆为例[J]. 干旱区地理, 1998, 21(2): 9-12.
- [17] 梁瑞驹, 王芳, 杨晓柳. 中国西北地区的生态需水[A]. 中国水利学会2000学术年会论文集. 中国三峡出版社, 2000: 71-75.
- [18] 潘启民. 黑河流域生态需水量分析[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2001, 13(1): 14-16.
- [19] 张远, 杨志峰. 林地生态需水计算方法与应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1566-1570.
- [20] 王芳, 梁瑞驹, 杨小柳, 等. 中国西北地区生态需水研究(1): 干旱半干旱地区生态需水理论分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 1-8.
- [21] 闵庆文, 何永涛, 李文华, 等. 基于农业气象学原理的林地生态需水量估算: 以泾河流域为例[J]. 生态学报, 2004(10): 2130-2135.
- [22] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算: 以黑河流域为例[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 129-134.
- [23] Thevs N, Peng H, Rozi A, et al. Water allocation and water consumption of irrigated agriculture and natural vegetation in the Aksu-Tarim river basin, Xinjiang, China [J]. Journal of Arid Environments, 2015, 112(pt.a): 87-97.
- [24] 吴建强, 李林, 谭娟, 等. 峰丛洼地植被生态需水定额及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6894-6901.
- [25] 陈乐. 石羊河流域面向生态的水资源优化配置研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [26] 周晓东. 基于GIS的云南小江流域植被生态需水分布规律[D]. 北京: 中国地质科学院, 2017.
- [27] 王岳川. 桂林市桃花江流域生态环境需水量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [28] 王岳川, 龙腾锐, 姜文超, 等. 桂林市桃花江流域生态环境需水量的初步研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(3): 102-105.
- [29] 侯琨, 王秀茹, 杜晓, 等. 桂林市桃花江流域生态环境需水量分析[J]. 水土保持研究, 2015(04): 338-341.
- [30] 吴卫熊, 吴建强, 何令祖, 等. 岩溶峰丛洼地植被生态需水计算及案例分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017: 1-8.
- [31] 吴建强, 李林, 谭娟, 等. 峰丛洼地植被生态需水定额及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 111-119.
- [32] 李坤峰. 石漠化区植被生态需水量研究及种植模式探讨: 以重庆市南川区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [33] 王宇, 张华, 张贵, 等. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 283-295.
- [34] Li J, Pu J, Zhang T, et al. Measurable sediment discharge from a karst underground river in southwestern China: temporal variabilities and controlling factors [J]. Environmental Geology, 2020, 79(4): 90.1-90.18.
- [35] 蓝芙宁, 劳文科. 南洞地下河流域水文地质综合调查成果报告[R]. 桂林: 中国地质科学院, 岩溶地质研究所, 2016.
- [36] 国家统计局. 云南省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [37] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [38] 陈丽华, 王礼先. 北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定[J]. 水土保持研究, 2002, 8(4): 161-164.
- [39] Saeid Sajedipour, Heidar Zarei, Somayeh Oryan. Estimation of environmental water requirements via an ecological approach: A case study of Bakhtegan Lake, Iran [J]. Ecological Engineering, 2017, 100: 246-255.
- [40] Dengkai Chi, Hong Wang, Xiaobing Li, et al. Estimation of the ecological water requirement for natural vegetation in the Ergune River basin in Northeastern China from 2001 to 2014 [J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 141-150.
- [41] 贾志军, 韩琳, 王鸽, 等. 三江平原典型下垫面FAO Penman-Monteith模型适用性分析[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1327-1334.

- [42] Sahin U, Kuslu Y, Tune P, Kiziloglu F M. Determining crop and pan coefficients for cauliflower and red cabbage crops under cool season semiarid climatic condition [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(2): 167-171.
- [43] Food and Agriculture Organization of the United Nations, Land and Water Division. The ET₀ Calculator Reference Manual [M]. Rome, Italy, 2012: 3-17.
- [44] 王赛男, 蒲俊兵, 李建鸿, 等. 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.
- [45] 韩昭庆. 清中叶至民国玉米种植与贵州石漠化变迁的关系[J]. *复旦学报(社会科学版)*, 2015, 57(4): 91-99.
- [46] 王炳亮, 李国胜. 1961-2010年辽河三角洲参考蒸散发变化特征及主导因子分析[J]. *地理科学*, 2014, 34(10): 1233-1238.
- [47] 曹雯, 申双和, 段春锋. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(3): 407-415.
- [48] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971-2008年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. *科学通报*, 2010, 55(22): 2226-2234.

Ecological water requirements of crops in typical karst fault-depression basins: A case study of the Mengzi area, Yunnan Province

ZENG Rui^{1,2}, ZHANG Tao², PU Junbing², LI Jianhong², WANG Sainan^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geography Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China. 2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The Mengzi fault-depression basin is a typical karst rocky desertification area, Yunnan Province. This area has serious soil erosion and leakage, difficult groundwater utilization, and prominent ecological water shortages, which seriously affect the integrity and health of the regional ecosystem. The purpose of this study is to help better solve the problems of severe water resources shortage and ecological environment problems, and provide reasonable suggestions for the agriculture development in this area. We estimate the reference evapotranspiration, ecological water requirements, and the artificial irrigation water requirements of different crops by using the Penman-Monteith formula, crop coefficients (FAO recommended) and the effective rainfall during the same period at three observation sites (Dawazi, Duogu and Niuerpo) of Mengzi in 2018. The results show that, (1) The reference evapotranspiration of these three places were 1, 346.10 mm, 1, 200.00 mm and 1, 064.30 mm, respectively, much more than the effective rainfall in the same period, indicating the climatic characteristics of strong evaporation, which increased the requirements of crops for water. At the same time, the reference evapotranspiration at three observation points exhibits obvious spatial and temporal differences, which make their agricultural planting conditions different; (2) The ecological water requirements quota of rice, wheat, peanut, rapeseed, soybean, potato and grape grown are much greater than the effective rainfall during the same time in Dawazi, indicating that all the crops planted there require massive irrigation to ensure their normal growth. There is a low matching degree between the kinds of planting crops and the planting background conditions, indicating that the agricultural planting structure in the basin needs to be adjusted in the future; (3) The difference between the effective rainfall and the ecological water requirements quota for corn and marigolds planted in Duogu and Niuerpo in the same period is small or even nearly matched, indicating that the planting of corn and marigold in the mountainous areas matches the local planting conditions. While the difference between the effective rainfall and the ecological water requirement of apple, flue-cured tobacco planted in Duogu and Niuerpo in the same period is large, indicating that large amounts of apples and flue-cured tobacco planted in plateau mountainous areas require more artificial irrigation; (4) The water required by most crops in their growth and development stage in the study area mainly depends on the artificial irrigation, which does not well match with the law of effective rainfall, implying that the agricultural structure and agricultural planting patterns need to be adjusted in this region.

In conclusion, this study suggests that some crops with less water consumption and higher heat requirements are suitable for planting in the basin. While some crops with better ecological protection and economic benefits are suitable for planting in the karst mountainous areas.

Key words rocky desertification, reference evapotranspiration, crop coefficient, ecological water requirements

(编辑 黄晨晖)