

包气带土体生物地球化学特征与氮转化研究

——以河北平原正定试验场剖面为例

任福弘 孙继朝 张 胜 贾秀梅 张翠云 叶思源

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所 河北正定)

摘 要 为研究氮素的生物地球化学循环问题,通过对河北平原典型试验场贯穿包气带 18.5 m 钻孔剖面土样的物理性质、地球化学指标、有机质含量的测试和微生物的培养鉴定,发现土体的氮素、可溶盐含量(TDS)、 Cl^- 含量以及微生物细菌的变化随深度不呈简单的线性分布。经分析认为,剖面中的粘性土层是生物的活性层,在氮素转化过程中起主导作用,剖面中多种指标的变化与地质结构呈良好对应关系,反映环境演化的过程。同时表明,包气带存在着更多尚待提取的全球变化对比研究信息。

关键词 包气带 生物地球化学 氮素转化

包气带(zone of aeration)是指地面以下潜水面以上的地带,又称非饱和带。此带是大气水、地表水、土壤水同地下水多水相互转化的地带,是地表、土壤污染物进入地下水的通道。也是大气圈、生物圈、岩石圈、水圈之间物质、能量传输、转换的枢纽地带,又是圈层间相互作用最为敏感、对人类生存的生态环境影响最为巨大的地带。在包气带中,气相、液相、固相多相并存,多种微生物共生,这里是一复杂的开放系统。包气带土体的氮转化,是自然界氮素总循环的重要组成部分。包气带土体生物地球化学特征的分析对揭示生物地球化学循环过程、了解人类活动影响、探讨未来生态系统的演变趋势和防治地下水污染都具有重要的科学价值。

1 研究区概况

正定试验场位于太行山东麓滹沱河的冲洪积扇上,地处北纬 $38^{\circ}10'$,东经 $114^{\circ}35'$,海拔高度 68 m,距河北省省会石家庄市 15 km。该区属暖温带半湿润、半干旱季风气候,多年平均降雨量为 498 mm。年平均气温 12.4°C 。近两年由于干旱少雨,降雨量不足 300 mm。为了研究包气带,对氮迁移转化的影响,于 1997 年 11 月 20 日在试验场施工了一眼贯穿包气带深为 18.45 m 的钻孔,取岩芯样品 97 组,最小取样间隔 0.1 m,先后对样品进行岩性鉴定、岩土

水理性指标测试、地球化学指标测定、微生物培养和有机质含量分析。取得测试数据 1 455 个。

2 包气带土体生物地球化学特征

包气带土体的结构决定了它的功能,在 18.45 m 的钻孔地质剖面中,5.1 m 以浅主要为粉质轻亚粘土及粉土,5.1 m 以深则以砂层为主夹有数层厚度不等的粉质亚粘土层,钻孔岩性见表 1。

表 1 钻孔岩性

Table 1 Lithologic record of drilling hole		
深度/m	厚度/m	岩性
0.0~0.3	0.3	耕作层
0.3~0.9	0.6	粉质亚砂土
0.9~1.2	0.3	粉质轻亚粘土
1.2~2.1	0.9	含砂亚砂土、粉土
2.1~3.4	1.3	粉质轻亚粘土
3.4~5.1	1.7	亚砂土、粉砂
5.1~5.3	0.2	细砂
5.3~9.5	4.2	中砂
9.5~10.2	0.7	粉质中亚粘土
10.2~10.6	0.4	粉砂
10.6~12.3	1.7	粉质重亚粘土
12.3~16.8	4.5	中砂
16.8~17.0	0.2	粉质重亚粘土
17.0~18.45	1.45	中砂

本文为国土资源部基础性研究项目第二课题(编号 9501110-02)和国土资源部学科生长点“地下水微生物生态学研究”项目野外试验场研究成果之一。

责任编辑:宫月萱。

第一作者 任福弘,1932 年生,研究员,从事矿水、地热水及水文地球化学研究,邮编 050803。

2.1 包气带剖面微生物分布特征

地下微生物以细菌为主 ,约占微生物总量的 70% ~ 80%(N. 沃尔克 ,1981 ;N. 亚历山大 ,1983)。微生物的活动不仅能促进岩石、矿物的风化和有机物质的分解 ,而且在为地表和地下生态系统提供营养和传输物质中起着重要的媒介作用。地球上 C、N、S、P 等生命元素的循环是影响全球变化的重要方面(符淙斌等 ,1996) ,微生物对这些循环 ,特别是对氮素的转化起着重要作用。地下的微生物种类很多 ,一克土壤里的微生物就有几千万个甚至几亿个之多。对正定试验场包气带剖面 97 组土样作了细

菌总数、硝化菌、固氮菌、反硝化菌和脱氮菌的培养鉴定 ,其随深度变化见曲线图 1。从图 1 可看出 5 种细菌指标的生物活性变化趋势具有良好的对应关系。在土壤表层 0 ~ 1.9 m 段 5 种细菌指标除个别外 ,大多显示出由上至下总的递减规律 ,这和以往土壤学的研究结果是一致的 ,尤其是细菌总数从 10^6 降至 10^3 ,有 3 个数量级的衰减 ;但在 2.0 ~ 5.0 m 出现了一个异常峰值区段 ;而在 5.0 ~ 9.4 m 为相对低值区段 ;9.5 ~ 12.3 m 为另一个高峰值变化段 ;12.4 ~ 16.8 m 又为一低值区段 ;16.9 ~ 18.45 m 的剖面末段曲线再次显示微生物活动增强。

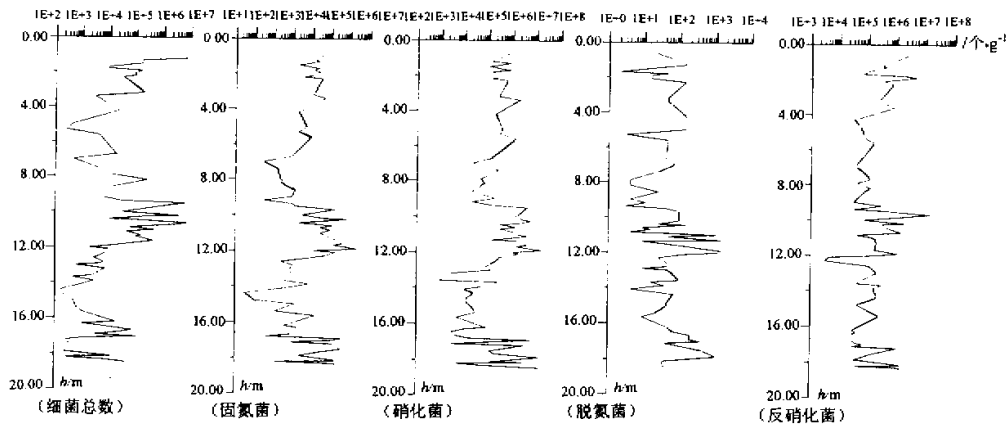


图 1 土样细菌指标随深度变化曲线

Fig.1 The changing curves of bacterial index with depth in the soil specimen

18.45 m 的包气带剖面微生物变化特征 ,一方面验证了以往在表层 2 m 内随深度增加土壤有机质含量减少 ,微生物活动逐渐减弱的结论 ;另一方面也看出土壤中微生物分布不是简单的自上而下递减 ,即使是在 2 m 以内也有波动 ,如 1.2 m 处的细菌总数高于 0.6 m 段 2 倍多。而在 2 m 以下随地质结构的变化出现了微生物活动强弱交替的层段变化。

2.2 包气带岩土体的物理化学指标

包气带土体的物理化学特性决定着微生物的环境特性 ,这些环境特性影响到微生物菌群的生存、繁殖、组合和作用强度。研究中测定了剖面土样的含水量、可溶盐含量(TDS)、 Cl^- 离子和有机质含量。其随深度变化的特点如图 2 所示。

2.2.1 土体的岩土水理性质指标变化特征 从土样的含水量指标随深度变化曲线看出 :其变化特征具有明显的分段性。0 ~ 1.9 m 段 ,含水量均值为

7% ;2.0 ~ 5.3 m 均值为 18% ;5.4 ~ 9.4 m 均值为 3% ;9.5 ~ 12.3 m 均值为 20% ;12.4 ~ 16.65 m 均值为 3% ;16.8 ~ 18.45 m 均值为 17%。总体上为 3 个高值区和 2 个低值区 ,并与细菌分布的峰谷变化趋势一致。土体的含水量与沉积物颗粒粗细所制约的容水性及持水性密切相关 ,细粒岩土容水性及持水性均优于粗粒岩土 ,且含水量大。另外靠近饱水带部位含水量往往受毛细作用影响而增大。

2.2.2 土体的地球化学指标随深度变化特征 土体的地球化学指标随深度变化的特征为 :

(1)土样的 TDS 值反映沉积物的可溶盐含量 ,在剖面中它与含水量随深度变化曲线有较好的关联性。0 ~ 1.9 m TDS 均值为 829 mg/kg ;2.0 ~ 5.5 m 为 1300 mg/kg ;5.6 ~ 9.4 m 为 431 mg/kg ;9.5 ~ 12.3 m 为 916 mg/kg ;12.4 ~ 18.45 m 段 TDS 含量介于 800 ~ 300 mg/kg 之间 ,其均值为 544 mg/kg。土体的

氯离子含量与上述曲线有类似的变化特点。

(2)土样的 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、全氮和碱解氮含量随深度变化情况如图 3 所示,氮素的曲线形态表征出包气带土体中各种形态的氮素含量在纵向上的变化特点具有较好的一致性。在土壤表层 0.6 m 深度的样品,土壤总氮、碱解氮和 NO_3^- 和 NO_2^- 含量出现高值,尤以碱解氮明显,在 1.2~1.9 m 层段则呈减少趋势,除 NH_4^+ 外,在 2.0~5.3 m 其余 4 项指标含量都在一个高值区,5.4~9.4 m 深度土壤的氮素含量明显增高;12.4~18.45 m 的剖面位置上,各种

氮含量又处在相对较低的水平;在 17.0~18.45 m 水位变动带附近, NO_3^- 含量有所增加。在上述含量高、低值的总变化趋势中,在粘性土层段还出现 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 含量在深度上的差异。

(3)土体有机质含量是沉积环境及其演化的指示计,随深度变化有机质含量在 0~1.9 m 段从 1.43% 逐渐降至 0.02%,均值为 0.42%;2.0~5.5 m 均值为 0.18%;5.6~9.4 m 均值为 0.03%;9.5~12.1 m 均值为 0.18%;12.3~18.45 m 均值为 0.08%,与微生物分布对应良好。

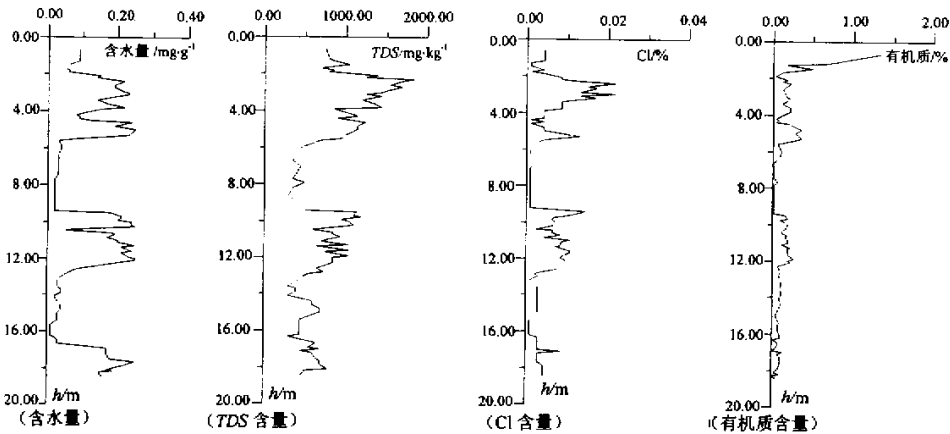


图 2 土样物理化学指标随深度变化曲线

Fig.2 The changing curves of physical chemistry index with depth in the soil specimen

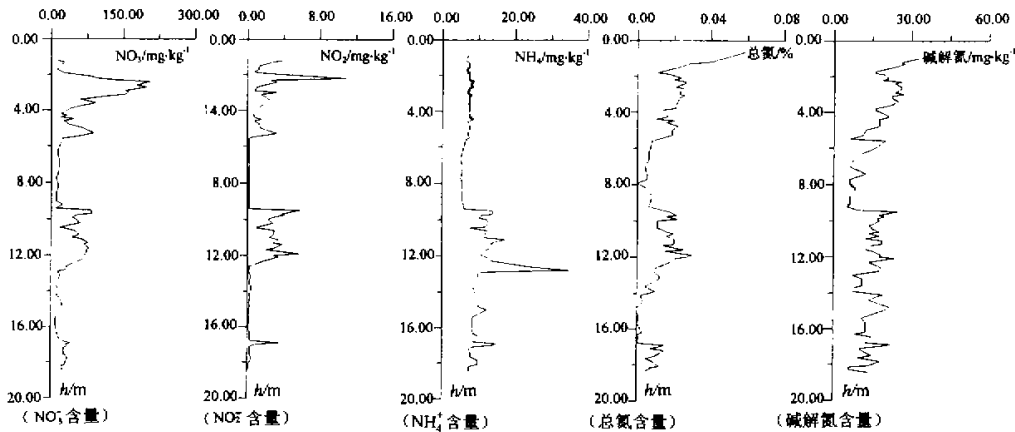


图 3 土样氮素指标随深度变化曲线

Fig.3 The changing curves of nitrogen index with depth in the soil specimen

综合各指标随剖面深度变化趋势 ,相互间存在着较好的关联性 ,曲线间的高值峰段与低值谷段的波动大都相吻合 ,多数曲线存在着 4 个峰值和 2 个低值区段。

(1)峰值段 0~1.9 m ,总特征是多数指标在 0.6 m 的近地表段出现高值 ,而后由高值向低值递减 ,尤以土壤的细菌总数、有机质含量、总氮含量、碱解氮、亚硝酸盐、反硝化菌和固氮菌表现明显 ,其它指标变化较平稳。

(2)峰值段 2.0~5.3 m(主要由粉质轻亚粘土组成) ,虽然各指标变化幅度有差异 ,但大多数呈现高值 ,特别是土壤含水量、硝酸根离子和氯离子变化较明显 ,硝酸根离子平均含量为全剖面之最高值(2.2~3.4 m 深度的粉质轻亚粘土层的增值最大)。土体中氯离子含量在该段未显示明显的富集特征。

(3)峰值段 9.5~12.3 m(主要由 2 层粉质重亚粘土夹薄层粉砂组成) ,所有指标在该段都示出峰值特征 ,尤其是土壤含水量、5 种微生物菌和 NH_4^+ 含量在该段出现最高值(尤以 10.7~12.3 m 层段为最)。

(4)峰值段 16.9~18.45 m ,该段处于地下水位波动带 ,土壤含水量与 5 种微生物菌在该段都有增高趋势 ,尤以固氮菌、硝化菌、反硝化菌明显。

(5)低值段 5.4~9.4 m 和低值段 12.4~16.9 m ,两层段都主要由中砂组成。在此两层段内 ,各指标含量均不同程度地出现相对较低的特点 ,土壤含水量与细菌总数反映尤为明显。

3 问题讨论

通过对正定试验场包气带土体剖面生物地球化学特征研究 ,初步取得了以下几点认识 ,并提出讨论 :

3.1 活性层是包气带土体剖面上的生物地球化学屏障

由一定比例粘粒成分(土中粒径大于 2 mm 的颗粒含量不超过总土重的 50% ,小于 0.005 mm 的粘粒含量超过 6%)构成的粘性土层 ,称之为活性层。这是由于粘性矿物与土壤的吸湿性、离子及微生物的吸附性以及较多的有机质含量等 ,对土壤微生物生长、繁殖和数量具有很大影响 ,成为土壤的活性中心 ,为此粘性土层亦称为活性层 ,它起着生物地球化学屏障的作用。

如果说地球化学屏障是指表生带在短距离内迁移条件明显交替并导致化学元素浓集的地段 ,是元素和化合物由迁移状态变为非迁移状态 ,那么生物地球化学屏障则是除了具有浓集元素和化合物的作用外 ,还由于活跃于此带的微生物作用促进元素或化合物的转化 ,尤其对氮元素价态转换的影响更为显著 ,因为氮循环过程中氮素转化的几个重要过程主要由微生物推动 ,在氮转化研究中把活性层视为生物地球化学屏障对理解和阐释包气带土体剖面的生物地球化学特征具有理论和实际的指导意义。

3.2 与活性层交接的非粘性土层 构成生物地球化学屏障的峰面

与活性层交接的非粘性土层是活性层与非活性层岩性变化过渡地段 ,是生物地球化学环境的交界线 ,是相对好气层和相对厌气层并存部位 ,形成生物地球化学屏障的峰面。根据它与活性层层位的上下关系 ,又可分为上峰面与下峰面。就所研究的剖面而言 ,位于粉质轻亚粘土之上的 2.0 m 深度段的粉土层段、位于粉质重亚粘土层之上的 4.5 m 深度段的中砂层段、位于粉质重亚粘土层之上的 10.6 m 深度段的粉砂层段、以及位于粉质重亚粘土层之上的 16.8 m 深度段的中砂层段均属于上峰面类型 ;位于粉质重亚粘土之下的 10.25 m 深度段的粉砂层段则属于下峰面类型。此次研究剖面上出现的高值峰区主要由生物地球化学屏障与其峰面组成。

从峰面的生物地球化学效应来看 ,上峰面更为显著。最典型的例子是 9.5 m 深度的中砂层段和 10.6 m 深度的粉砂层段 ,除 pH、TDS、 Cl^- 外 ,大多数测试项目均显示了不同程度的高值异常 ,在诸异常中 ,尤以细菌总数的增值最为突出。峰面上异常的出现 ,可能与岩性过渡带通气层和厌气层并存形成了有利于生物地球化学作用的生态环境有关(如通气性、有机质、粒度成分、湿度等因素的贡献性搭配)。其机制问题尚需进一步探讨。

3.3 活性层与非活性层某些生物地球化学指标的对比分析

为了研究活性层与非活性层某些生物地球化学特征上的差异性 ,选择 3 个厚度较大的粘性土层段和 3 个厚度较大的中砂层段 ,进行对比分析(表 2)。

粘性土层段与中砂层段有机质与总氮量之间具有各自的对应关系 :在大多数情况下 ,前者有机质含量为 0. n % ,总氮量为 0.0n mg/kg ;后者有机质含

表 2 粘性土层段与中砂层段地球化学指标特征

Table 2 Geochemistry index feature in the clay layer and mid-sand layer

粘性土层段			中砂层段		
样品层段 深度/m	地球化 学指标	平均含量 mg·kg ⁻¹	样品层段 深度/m	地球化 学指标	平均含量 mg·kg ⁻¹
2.1~3.4	TDS	1481.3	5.5~9.5	TDS	480.8
	Cl ⁻	149		Cl ⁻	25
	NO ₃ ⁻	149.9		NO ₃ ⁻	18.58
	NO ₂ ⁻	2.2		NO ₂ ⁻	0.21
	NH ₄ ⁺	7.56		NH ₄ ⁺	5.8
9.5~10.2	TDS	1133	14.1~16.8	TDS	525
	Cl ⁻	67		Cl ⁻	25
	NO ₃ ⁻	55.7		NO ₃ ⁻	15.97
	NO ₂ ⁻	3.13		NO ₂ ⁻	0.248
	NH ₄ ⁺	11.7		NH ₄ ⁺	0.35
10.6~12.3	TDS	870	17.1~18.45	TDS	581.3
	Cl ⁻	90		Cl ⁻	40
	NO ₃ ⁻	67.3		NO ₃ ⁻	28.4
	NO ₂ ⁻	2.95		NO ₂ ⁻	0.22
	NH ₄ ⁺	12.6		NH ₄ ⁺	8.13

量为 0.0n% ,总氮量则为 0.00n mg/kg ,上述对应关系反映了有机质含量与总氮量的内在关系。同样 ,总氮/碱解氮在二者之间也有差别 ,前者为0.00n ;后者为0.000n (当碱解氮减小一个数量级时 ,比值增加一个数量级)两类不同岩性总氮的含量差别是造成比值差的主因。

有机质和湿度是影响微生物生长和繁衍的重要环境条件 ,对于上述条件 ,粘性土层具备优于砂层的特点。因此 ,在微生物含量上二者有明显的差异 ,除表层和接近含水层的砂层段外 ,在总体上粘性土层中各菌类均高于砂层。其中尤以硝化菌和固氮菌的反映最为明显。由于地质剖面上土体粒度成分分布的不均一性以及微生物场态控制性因素的多样性 ,在剖面上微生物含量的波动较大。粘性土层和与中砂层在地球化学指标上的差别主要表现在 :前者的 TDS 与 Cl⁻ 含量较后者高出一倍多。TDS 在粘性土层随深度减少 ,砂层则相反 ;粘性土层 TDS 场所具有的反向演化(即随深度减小)特点 ,除与近地表人为影响有关外 ,是否还隐含着气候变化的信息? Cl⁻ 离子除 2.2~3.4 m 外 ,在粘性土层与砂层均为

正向演化 ,其变化幅度很小 ,这与 Cl⁻ 的地球化学特点有关。

三氮在两类土体层段的变化很好地体现了活性层与非活性层的生物地球化学作用的差异。粘性土层 NO₃⁻ 含量最高可高出中砂层三倍之多 ,NO₂⁻ 含量可相差一个数量级。NH₄⁺ 含量在总体上粘性土层略高于中砂层。

将不同深度的粘性土层的三氮含量加以比较可以看出 ,NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺ 含量的高值段分别出现在不同的深度上 :NO₃⁻ 在 2.2~3.4 m 深度段 ;NO₂⁻ 在 9.7~10.2 m 深度段 ;NH₄⁺ 在 10.7~12.3 m 深度段。上述不同态氮出现于不同深度的特点反映了它们对氧化还原条件的依附性。

需要指出的是 ,剖面上还出现了 2 个 NH₄⁺ 含量的高值异常点 ,位于 12.6 m、12.8 m 中砂层的两个取样段 ,其含量分别为 24 mg/kg 和 35 mg/kg ,超出粘土层一倍之多。与上述 2 异常点相对应 ,出现全剖面仅有的 2 个 pH 值低异常点 ,分别为 6.3 和 6.7。这是剖面上仅有的偏酸性环境 ,NH₄⁺ 特高值出现的机制与其所处的酸性环境有关。陈文新(1996)指出 :NH₃ 的离子化(即离子化为 NH₄⁺)高度依赖于环境中的 pH 值 ,较低的 pH 值有利于 NH₄⁺ 的积累。

在上述几个地球化学指标中 ,TDS、NH₄⁺ 受控于颗粒的吸附性 ,而 Cl⁻ 和 NO₃⁻ 则很少受吸附性的影响。Cl⁻ 含量在两类土层和不同层位的变化除个别层段外 ,基本上是在一个数量级内波动。NO₃⁻ 则不同 ,其含量不仅有不同土层的变化 ,也有同一土类不同层段的变化 ,反映出它的积累过程与微生物场态紧密相关的特点。

3.4 关于水位变动带与氮转化有关的菌群异常

异常带出现在薄层(0.2 m)粉质重亚粘土之下 ,距潜水面 1.3 m 的中砂层段 ,是土体剖面上由包气带向饱水带转换的过渡空间。它的特点是 :与其上部中砂层段不同 ,粘性土层下的中砂层段的固氮菌、硝化菌、脱氮菌、反硝化菌在此砂层段内没有明显的衰减。硝化菌数超过上覆粘性土层段并达到剖面上粘性土层硝化菌数的最高数量级(10⁸)。脱氮菌、硝化菌高点值也高出上覆粘性土层的细菌数 ,形成了以上述菌群活化为特征的微生物垒。另外 ,与其上部的中砂层段不同 ,其含水量高出一个数量级 ,达到

粘性土层含水量的量级。在这个层段上还出现了 NO_3^- 含量增多的趋势。

将上述异常与所研究的各项指标对比分析 ,此砂层段的含水量是异常带可与粘性土层的水理特征相比拟的指标。是否此数量级含水量的 PF 值是一个贡献性的因子 ?! 这只是一个统计学相关的结论。控制微生物场态的因素很多 ,复杂的机理问题还须多学科联合深入研究。

4 结语

(1)不同价态的氮元素及与其相关的微生物含量 ,在包气带土体剖面上的分布不是一个简单的线性递增或衰减过程。其在剖面上的丰度波动及其递增和衰减的幅度受地球化学场及其组构形式的制约。

(2)在包气带剖面上 ,不仅自上而下存在着纵向的层间氮转化过程 ,也在不同的层段内部进行着强度不等的氮素形态转化。只有深入研究上述两个侧面氮转化的机制 ,才能全面认识氮在地质大循环基础上的地区和地段的生物地球化学小循环特征。

(3)包气带土体剖面上由活性层及相邻土层构

成的生物地球化学屏障和峰面及水位变动带的微生物学特征 ,为氮素污染地下水的阻控以及污染土体 (如有机化学物质污染等)的原位生态修复技术研究开辟了新的思路。

(4)包气带剖面中各种分析指标与其地质结构的对应关系揭示它们对研究区环境演变具有记忆效应 ,这些指标的提取对认识环境演变过程非常重要 ,也就是说包气带中储存着更多环境演变研究的可提取信息。

总之 ,包气带土体生物地球化学场十分复杂 ,问题所涉及的学科领域也很广泛 ,限于专业 ,本文所提出的一些看法仅是初步的 ,恳请批评指正。

在课题研究及撰写本文过程中 ,得到张宗祜院士的指导和支持 ,谨表谢意。

参 考 文 献

陈文新主编. 1996. 土壤和环境微生物学. 北京 :北京农业大学出版社.
符凉斌 ,严中伟主编. 1996. 全球变化与我国未来的生存环境.
N. 沃尔克编. 1981. 土壤微生物学. 北京 :科学出版社.
N. 亚历山大著. 1983. 土壤微生物学导论. 北京 :科学出版社.

A Study of Biogeochemistry and Nitrogen Transform
in the Unsaturated Soil Zone

Ren Fuhong Sun Jichao Zhang Sheng Jia Xiumei Zhang Cuiyun Ye Siyuan
(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology , CAGS ,Zhengding ,Hebei)

Abstract For the purpose of studying biogeochemical circulation of nitrogen element , a borehole 18.45 m in depth was drilled in the unsaturated soil zone of Zhengding experimental site. Sediment samples were collected along the section. Water-physical properties and some geochemical indexes were analysed , and bacteriologic examination of the samples was conducted. It is found that the changes of nitrogen element and TDS and Cl^- and bacteria of the samples are not simply in linear distribution with the increasing depth of the section. They correspond to geological configuration and indicate environmental evolution. Being sensitive to bacteria and called“ active layer ” ,the clayey layer on the section plays a dominant role in nitrogen element transformation. The changes also indicate that there are many kinds of environmental evolution or global change information which remain to be drawn from the unsaturated zone.

Key words unsaturated zone biogeochemistry circulation of nitrogen