

DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2018. 03. 20

包气带反硝化强度空间分布规律的整合分析

耿宏志¹, 郇环², 李鸣晓², 张莹¹, 张军军³, 席北斗²

(1. 防灾科技学院, 河北三河 065201; 2. 国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室/
中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 依据 1970~2017 年间发表的 3955 篇包气带反硝化强度相关论文, 筛选出 197 组反硝化强度数据, 利用整合分析, 重点研究了包气带反硝化强度在典型生态类型(水平)和不同采样深度(垂向)的空间分布规律, 识别了包气带反硝化强度的主控因素并研究其函数关系。结果表明: 水平空间上, 包气带表层 0~0.5 m 反硝化强度的分布特征显著, 由大到小排序为: 森林(8.03 ± 0.21 mg/(kg·d))、农田(3.54 ± 0.08 mg/(kg·d))、草地(3.38 ± 0.12 mg/(kg·d))、湿地(2.32 ± 0.23 mg/(kg·d))、沙漠(2.15 ± 0.56 mg/(kg·d))。垂向空间上(6 m 内), 各生态类型反硝化强度随深度的增加均呈“S”型变化规律。不同生态类型和不同采样深度下包气带反硝化强度的主控因素存在一定差异, 主要为黏粒、有机质、全氮、硝态氮、有效磷, 并给出了包气带反硝化强度与主控因素的回归方程。

关键词: 包气带; 反硝化强度; 生态类型; 采样深度; 整合分析

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)03-0146-07

Meta-analysis of the spatial distribution of denitrification intensity in the vadose zone

GENG Hongzhi¹, HUAN Huan², LI Mingxiao², ZHANG Ying¹, ZHANG Junjun³, XI Beidou²

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201, China;

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution/Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this paper, the denitrification intensity data of 197 groups are screened out according to 3955 papers on the vadose zones published from 1970 to 2017. Based on the meta-analysis, the spatial distribution of denitrification intensity in typical ecological types (horizontal) and different sampling depths (vertical) is studied emphatically, the main factors of denitrification intensity in the vadose zone are analyzed and their function relations are studied. The regression function is used to obtain the denitrification intensity relation of the vadose zone. The results show that in the horizontal direction, the distribution characteristics of denitrification intensity of 0~0.5 m in the vadose zone are significant, which are sorted from big to small as follows: forest (8.03 ± 0.21 mg/(kg·d)), farmland (3.54 ± 0.08 mg/(kg·d)), grassland (3.38 ± 0.12 mg/(kg·d)), wetland (2.32 ± 0.23 mg/(kg·d)), and desert (2.15 ± 0.56 mg/(kg·d)). In the vertical direction (within 6 m), the denitrification intensity of each ecological type is of the “S” type with the increasing depth. There are some differences in the main controlling factors of the denitrification intensity in the vadose zone under different ecological types and sampling depths, including clay, organic matter, total

收稿日期: 2017-07-22; 修订日期: 2017-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602260); 中央高校基本科研业务费专项基金(ZY20170312); 北京市自然科学基金(8164066)

第一作者: 耿宏志(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤、地下水污染与防治研究。E-mail: fz_gzh91@163.com

通讯作者: 郇环(1984-), 女, 副研究员, 主要从事地下水科学与工程及地下水污染防治研究等。E-mail: hhuan0825@163.com

nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus. The regression equation between the denitrification intensity and the main controlling factors in the vadose zone is given.

Keywords: vadose zone; denitrification intensity; ecological type; sampling depth; meta-analysis

包气带是防止地下水受到硝酸盐污染的主要屏障,而反硝化作用是有效阻控和消散硝酸盐的主要机制,可使因淋溶进入地下水的硝酸盐减少,削减硝酸盐积累对生物的毒害作用^[1~2]。反硝化作用是氮素循环中不可或缺的环节,广泛存在于全球各地的包气带中,主要依赖微生物通过还原酶将硝酸盐转化为氮气和氮的氧化物^[3~4]。

反硝化强度作为包气带防护地下水硝酸盐污染能力的定量表征,是目前包气带反硝化作用研究的热点和难点^[5]。近年来,为揭示包气带反硝化强度在水平空间的分布规律,众多学者就不同生态类型下的包气带反硝化展开了一系列的研究。Mckeon等^[6]分析了沙漠生态类型下包气带的反硝化能力,揭示了反硝化对生物地球化学循环及氮元素过量的作用;陈哲等^[7]研究了不同施肥条件下农田包气带反硝化潜力的变化特征;邓焕广等^[8]经探究发现,河岸带草地生态类型下包气带反硝化速率的主要影响因素为植被类型;程建华^[9]分析了森林和湿地生态类型下包气带反硝化潜力的变化情况及其与水文条件和环境因子之间的关系。然而当前研究多集中在单一生态类型,缺乏对不同生态类型下包气带反硝化强度的综合对比研究。同时,由于影响包气带反硝化测定的因素错综复杂,缺乏较合适的直接测定方法^[10],目前对包气带不同深度反硝化强度的研究并不全面。王庆成等^[11]采用硝酸根消耗量法测定了不同背景下河岸带土壤反硝化强度及影响因素,发现河岸带表层土壤(0~0.2 m)的反硝化强度大于底层(0.2~0.4 m);孙志高等^[12]应用乙炔抑制法研究了三江平原湿地0~0.2 m土壤反硝化速率及其与环境因子的关系;Hobbie^[13]通过¹⁵N同位素示

踪法量化了表层土壤及较深土层之间反硝化速率的差异;Peterson等^[14]通过乙炔抑制法分析了底土(0.4~0.85 m)与冲积砂砾层(1.2~4.8 m)之间反硝化潜力的差异,并指出有机碳为影响反硝化的主要因素。综上,目前包气带反硝化强度研究主要集中在0~0.5 m的土壤表层,对包气带下部以及土壤表层与包气带下部的反硝化强度差异性研究较少,包气带反硝化强度的垂向分布规律尚不明确。

本文在大量查阅国内外包气带反硝化强度相关文献的基础上,采用整合分析方法,重点总结了包气带中反硝化强度在水平(典型生态类型)和垂向(不同采样深度)的空间分布规律,识别了不同条件下包气带反硝化强度的主控因素,建立了包气带反硝化强度与环境因素之间的函数方程。研究结果对于硝酸盐在包气带中的迁移转化过程模拟、包气带对地下水硝酸盐污染防治能力研究等领域具有重要的基础支撑作用。

1 材料与方法

1.1 数据获取与质量控制

以“包气带(Vadose zone)”、“土壤(Soil)”和“反硝化(Denitrification)”为主题,对中国知网(CNKI)和Web of Science收录的期刊论文和学位论文进行检索,获得1970~2017年间文献3 955篇,筛选出86篇文献。本研究中包气带指表层土壤与下包气带。文献筛选标准如下:(1)具有明确的反硝化强度的数据;(2)具有明确的生态类型、采样深度及包气带理化性质等参数。从满足上述条件的文献中共提取197组包含包气带反硝化强度及相应理化性质参数,数据统计结果见表1。

表1 包气带反硝化强度及理化性质基本情况统计表

Table 1 Statistics of the denitrification intensity and physicochemical properties in the vadose zone

指标	反硝化强度/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	黏粒/%	pH	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	容重/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)	碳氮比	含水率/ %	温度/ $^{\circ}\text{C}$
样本	197	161	154	134	132	132	85	81	125	117	126	120
均值	2.67	16.33	6.53	10.06	2.33	44.76	7.38	1.44	1.35	5.86	20.60	21.35

1.2 数据分析

整合分析是对同一主题下的若干独立研究结果进行定量综合研究的统计方法。本研究技术路线见图1,首先根据数据的完整性对其进行筛选归类;其次查

阅相关文献、资料,补充缺失部分的属性值并标准化处理;随后进行相关性分析识别影响因素,在此基础上对反硝化强度进行回归分析得出包气带反硝化强度函数方程。

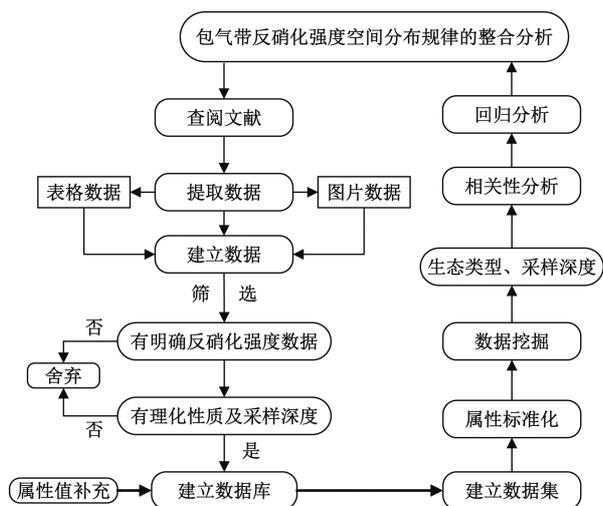


图1 技术路线图

Fig. 1 Technical flow chart

Vitousek 等在 1991 年指出,包气带中的反硝化作用导致氮在不同生态类型中具有明显的差异性^[15]。统计发现,以往对不同生态类型的研究主要集中在草地、农田、湿地、森林、沙漠,为探讨包气带反硝化强度水平空间的分布规律,按以上五种生态类型进行分类。为明确包气带反硝化强度在垂向空间的分布规律,针对统计数据分布特征,将其按照不同采样深度分为 0~0.2 m, 0.2~0.5 m, 0.5~1 m, 1~3 m, 3~6 m 五组。包气带反硝化数据去除极端值后,统计分析得到

表2 包气带反硝化强度空间分布

Table 2 Spatial distribution of denitrification intensity in vadose zone

$/(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$

包气带属性	0~0.2 m	0.2~0.5 m	0.5~1 m	1~3 m	3~6 m
草地	3.38 ± 0.12 (24)	1.54 ± 0.55 (10)	1.13 ± 0.48 (10)	1.81 ± 0.66 (7)	0.08 ± 0.03 (7)
农田	3.54 ± 0.08 (31)	3.32 ± 0.26 (9)	1.30 ± 0.08 (7)	2.63 ± 0.53 (7)	0.23 ± 0.06 (7)
湿地	2.32 ± 0.23 (12)	0.44 ± 0.31 (7)	-	-	-
森林	8.03 ± 0.21 (14)	4.22 ± 0.22 (12)	1.36 ± 0.11 (6)	2.07 ± 0.71 (6)	-
沙漠	2.15 ± 0.56 (9)	0.41 ± 0.34 (6)	-	-	0.04 ± 0.05 (6)

注:括号内数值为样本数。

为研究包气带反硝化强度在水平和垂向空间上的主要影响因素,对统计数据筛选并进行 Spearman 相关性分析,结果见表 3。地下 0~0.2 m:草地、农田和森林反硝化强度均与黏粒、硝态氮显著正相关,森林反硝化强度还与有机质显著正相关,沙漠反硝化强度与黏粒显著正相关;地下 0.2~0.5 m:草地反硝化强度与黏粒、硝态氮显著正相关,农田反硝化强度与有效磷显著正相关,湿地反硝化强度与黏粒、有机质显著正相关,森林反硝化强度与硝态氮显著正相关;地下 0.5~1 m:农田反硝化强度与有机质、全氮及有效磷显著正相关;1~3 m:草地反硝化强度与全氮显著正相关;3~

其分布情况,结果见表 2。

2 结果与分析

2.1 包气带反硝化强度分析

由表 2 可知,水平空间上不同生态类型的包气带反硝化强度分布存在一定差异。包气带反硝化强度在地下 0~0.5 m 间呈现出森林 > 农田 > 草地 > 湿地 > 沙漠的整体特征;地下 0.5~1 m 和 1~3 m 处农田、森林、草地三者反硝化强度差异不大;3~6 m 呈现出农田 > 草地 > 沙漠的整体特征。

垂向空间上,不同采样深度下包气带反硝化强度的分布也存在一定规律。草地与农田生态类型下包气带反硝化强度均在 0~1 m 内减小,在 1~3 m 上升达到次峰值,并在 3~6 m 逐渐降低至最小;由于湿地生态类型在埋深 0.5 m 以下的反硝化研究相对较少,因此,本次统计仅针对 0.5 m 内研究成果进行分析发现,湿地生态类型反硝化强度在 0~0.5 m 呈减小趋势;森林生态类型下包气带反硝化强度在 0~1 m 范围内逐渐减小,在 1~3 m 上升达到次峰值;沙漠生态类型反硝化强度在 0~0.5 m 减小,因其在 0.5~3 m 内反硝化研究较少而难以判断该深度的变化情况,在 3~6 m 处达到最小值 0.04 mg/(kg·d)。整体来看,反硝化强度在包气带垂向空间上呈“S”型变化趋势。

6 m 处,未发现各生态类型反硝化强度与理化性质之间存在显著相关性。

2.2 模型拟合

为确定包气带反硝化强度与理化性质之间的函数关系,对统计显著的反硝化强度与理化性质进行回归分析。本文采用线性 (Linear)、二次曲线 (Quadratic)、三次曲线 (Cubic)、S 曲线 (S)、幂函数 (Power) 等模型对其进行模拟检验,由方差分析表中 F 值和模型概述表中 R^2 值确定拟合效果^[16]。结合数据结果,选取判定系数 (R^2) 高于 0.85 的拟合结果建立包气带反硝化强度与理化性质之间的回归方程,拟合结果见表 4。

表 3 包气带反硝化强度与理化性质之间的 Spearman 相关性

Table 3 Spearman correlation between the denitrification intensity and physicochemical properties in the vadose zone

生态	深度/m	黏粒	pH	有机质	全氮	硝态氮	氨氮	有效磷	容重	C/N	含水率	温度
草地	0~0.2	0.82** (19)	0.02(17)	0.35(11)	0.09(11)	0.81** (11)	0.30(6)	0.55(6)	0.27(11)	0.53(6)	0.18(11)	0.33(9)
	0.2~0.5	0.81** (9)	0.54(9)	0.41 (8)	0.09(8)	0.88** (8)	0.20(6)	0.43(6)	0.32(8)	0.45(6)	0.22(6)	0.25(6)
	0.5~1	0.67(9)	0.23(9)	0.56(7)	0.11(7)	0.55(7)	0.11(6)	0.21(6)	0.13(6)	0.33(6)	0.33(6)	0.35(6)
	1~3	0.53 (6)	0.26(6)	0.33(6)	0.94* (6)	0.51(6)	-	0.11(6)	0.17(6)	0.31(6)	0.43(6)	0.34(6)
	3~6	0.11(6)	0.62(6)	0.53(6)	0.60(6)	0.53(6)	-	-	0.25(6)	0.10(6)	0.46(6)	0.24(6)
农田	0~0.2	0.67** (21)	0.37(19)	0.25(15)	0.02(13)	0.74* (13)	0.35(6)	0.26(9)	0.18(9)	0.22(9)	0.17(11)	0.34(9)
	0.2~0.5	0.43 (7)	0.44(6)	0.32(6)	0.68(6)	0.66(6)	0.23(6)	0.94* (6)	0.16(6)	0.65(6)	0.43 (6)	0.37(6)
	0.5~1	0.77(7)	0.51(7)	0.78* (7)	0.85* (7)	0.82(7)	0.13(6)	0.95** (6)	0.13(7)	0.39(6)	0.53(6)	0.32 (6)
	1~3	0.69(7)	0.32(6)	0.66(6)	0.53(6)	0.53(6)	0.18(6)	0.66(6)	0.33(6)	0.31(6)	0.45(6)	0.15(6)
	3~6	0.66(7)	0.49(6)	0.55(6)	0.24(6)	0.25(6)	-	0.38(6)	0.16(6)	0.60(6)	0.43(6)	0.05(6)
湿地	0~0.2	0.77(8)	0.33(8)	0.07(6)	0.36(6)	0.52(6)	0.57(6)	0.66(6)	0.31(6)	-0.14(6)	0.65(8)	-0.46(6)
	0.2~0.5	0.86* (7)	0.20(7)	0.86* (6)	0.71(6)	0.71(6)	0.21(6)	-	0.38(6)	0.33(6)	0.56(6)	0.33(6)
森林	0~0.2	0.77* (9)	-0.20(9)	0.88** (8)	0.14(8)	0.74** (8)	0.29(6)	0.05(6)	0.18(6)	0.53(6)	0.01(6)	0.38(6)
	0.2~0.5	0.68(8)	0.31(8)	0.75(6)	0.01(6)	0.94** (6)	0.09(6)	0.10(6)	0.21(6)	0.63(6)	0.18(6)	0.23(6)
	0.5~1	0.53(6)	0.51(6)	0.68(6)	0.13(6)	0.86* (6)	-0.05(6)	0.12(6)	0.35(6)	0.33(6)	0.51(6)	0.23(6)
	1~3	0.66(6)	0.43(6)	0.56(6)	0.15(6)	0.56(6)	-	-	0.08(6)	0.45(6)	0.23(6)	0.11(6)
沙漠	0~0.2	0.95** (7)	0.34(7)	0.32(6)	0.54(6)	0.36(6)	0.11(6)	-	0.54(6)	0.44(6)	0.13(6)	0.12(6)
	0.2~0.5	0.66(6)	0.31(6)	0.23(6)	0.12(6)	0.12(6)	0.11(6)	-	0.23(6)	0.15(6)	0.13(6)	0.12(6)
	3~6	0.35(6)	0.28(6)	0.22(6)	0.08(6)	0.10(6)	-	-	0.21(6)	0.12(6)	0.07(6)	0.07(6)

注: * 表示显著水平为 0.05 (双尾检测); ** 表示显著水平为 0.01 (双尾检测); 括号内数值表示样本数。

表 4 包气带反硝化强度与理化性质之间的回归分析

Table 4 Regression analyses of the denitrification strength and physical and chemical properties of the vadose zone

因变量	自变量	模型	回归方程	判定系数 R ²	F 值
草地 0~0.2 m 反硝化强度	硝态氮	三次曲线	$y = 1.27 + 1.51x_1 - 0.076x_1^2 + 0.001x_1^3$	0.949	105.04
草地 0.2~0.5 m 反硝化强度	黏粒	二次曲线	$y = -10.28 + 0.266x_2 - 0.028x_2^2$	0.858	9.77
草地 1~3 m 反硝化强度	全氮	二次曲线	$y = 0.265 - 1.73x_3 + 2.8x_3^2$	0.977	63.21
农田 0.2~0.5 m 反硝化强度	有效磷	S 曲线	$\ln y = 6.1 - 0.432/x_4$	0.979	188.97
农田 0.5~1 m 反硝化强度	有机质	幂函数	$y = 0.005x_5^{7.26}$	0.945	86.12
湿地 0.2~0.5 m 反硝化强度	黏粒	对数曲线	$y = -1.48 + 0.82\ln x_2$	0.949	92.45
森林 0~0.2 m 反硝化强度	有机质	二次曲线	$y = 4.33 - 2.96x_5 + 0.19x_5^2$	0.979	116.82
森林 0.2~0.5 m 反硝化强度	硝态氮	线性	$y = -25.93 + 1.05x_1$	0.948	72.93
沙漠 0~0.2 m 反硝化强度	黏粒	二次曲线	$y = -0.17 + 0.046x_2 + 0.002x_2^2$	0.856	23.87

注: y——反硝化强度/(mg·kg⁻¹·d⁻¹); x₁——硝态氮浓度/(mg·kg⁻¹); x₂——黏粒含量/%; x₃——全氮浓度/(g·kg⁻¹); x₄——有效磷浓度/(g·kg⁻¹); x₅——有机质浓度/(g·kg⁻¹)。

3 讨论

3.1 包气带反硝化强度分布规律分析

包气带反硝化强度的空间分布特征,可能与历史地理因素以及当代环境因素有关^[17]。不同生态类型的包气带是在不同环境条件下经长时间复杂作用形成的,鲜明的特征导致反硝化强度的空间分布差异。

水平空间上,地表 0~0.5 m 处:森林在自然条件下凋落量大、释放养分多,对有机物的转化速率也显著高于其他生态类型^[18],而有机物降解提高了反硝化对氧气的需求量,加速了无氧环境的形成,使森林生态类型反硝化强度高于其它生态类型;农田因人类农业生产施肥过程的影响,氮、磷在地表附近定向富集^[19],提升了反硝化强度;草地干湿交替变化可以促进土壤中

团聚体包裹的有机质释放,使有机物及氮素含量上升^[20],为反硝化提供便利条件;湿地生态类型的氮源和能源主要来源于动植物残体和生物固氮^[21],有机质含量成为限制反硝化的主要因素,而氮素来源途径的缩减使反硝化强度相应减小;沙漠生态类型因各种环境因素均很难满足反硝化发生的条件,故其反硝化强度最小。

随深度增加,反硝化所需有机物和氮素等含量均有所下降,反硝化强度发生不同程度的降低,0.5~1 m 处反硝化强度同上部区域趋势相同,保持森林(1.36 mg/(kg·d)) > 农田(1.30 mg/(kg·d)) > 草地(1.13 mg/(kg·d))的整体特征。在 1~3 m 处,可能受微生物的影响农田、森林、草地反硝化强度又发生不同程度的回升。3~6 m 处,反硝化强度均保持较低状态,受

生态类型背景条件差异影响,反硝化强度由大到小排序依次为农田、草地、沙漠。

研究还发现黏粒含量与各生态类型表层(0~0.5 m)反硝化强度正相关或显著正相关,黏粒作为土壤物理、化学性质的根源,对微生物活动及包气带反硝化具有一定作用。而且,作为包气带介质的重要组成部分,

成分,黏粒含量直接影响介质类型的变化,为揭示包气带反硝化强度与介质中黏粒含量之间的关系,本文在Nieder^[22]统计的草地生态类型下不同包气带介质反硝化强度结果的基础上,对不同包气带介质的反硝化强度进行了补充(表5)。结果表明,反硝化强度随包气带介质中黏粒含量的减小而减小。

表5 不同包气带介质类型反硝化强度

Table 5 Denitrification intensity with different media types of the vadose zone

参考来源	地点	测试方法	生态类型	测试深度/m	包气带介质	反硝化强度/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)
Colbourn <i>et al.</i> , 1984 ^[23]	英国 Oxford	乙炔抑制法	草地	-	灰黏土	2
Egginton and Smith, 1986 ^[24]	英国 Edinburgh	乙炔抑制法	草地	-	始成土	28
Cannavo <i>et al.</i> , 2004 ^[25]	法国 Avignon	N ¹⁵ 同位素示踪法	农田	0~0.3	黏土	1.35
				0.3~0.6	砂黏壤	0.034
				0~0.3	壤砂土	0.22~0.397
Beggs <i>et al.</i> , 2011 ^[26]	美国 California	乙炔抑制法	-	0.23~0.3	砂壤土	0.27~0.448
				0.45~0.55	粉砂壤土	0.26~0.442
				0.4~0.85	杂色砂质黏土	0.514
				1.2~1.4	含砾细砂	0.04
				2.05~2.35	砂质黏土与黏土	0.156
Peterson <i>et al.</i> , 2014 ^[14]	新西兰 Lincoln	乙炔抑制法	农田	4.27~4.6	砂砾石	0.058
				4.6~4.8	砾石与黏土	0.14
				0~0.1	粉砂质黏土	1.01
高阳,等,2015 ^[27]	中国 焦作	气压过程分离法	农田	0~0.1	粉砂质黏土	0.6

垂向空间上,各环境因素主要与包气带浅层反硝化强度相关性显著,与深层关系不明显。草地生态类型受土壤团聚体影响,在深度由0~0.2 m变化到1~3 m时,其主要影响因素由硝态氮变为全氮。农田生态类型受人类生产中施用化肥的影响,0~1 m土壤中全氮、硝态氮及有效磷迅速累积,结果与前人研究结论相符^[28],氮素和有机物的大量富集提升了反硝化强度;随深度增加,有机物与氮素含量均迅速降低,反硝化强度也随之减弱。森林生态类型则因表层土壤(0~0.5 m)有机物和氮素含量较高,表现为表层土壤的反硝化强度大于下层包气带。草地、农田、森林生态类型反硝化强度均在1~3 m处出现次峰值。据 Legout 等^[29]通过室内模拟发现,微生物活性随包气带深度一起下降,而在有机土壤层下1~3.5 m处再度活跃。推测,地下1~3 m处存在活跃的自养反硝化微生物活动,如:脱氮硫杆菌活跃在不同深度范围,并通过氧化硫或硝酸盐获得能量,从而促进反硝化的发生。受垂向运移及地球生物化学过程的影响,各生态类型反硝化强度在3~6 m深度处,均因各环境因素指标较低而达到最低值,并且与各环境因素之间无明显相关性。

3.2 反硝化强度统计结果的不确定性分析

本次研究统计结果存在一定不确定性,主要来源

于测试方法、计算过程、分类和统计等方面。

(1) 本文筛选获得数据多为室内模拟与野外原位测试结果,室内实验容易达到反硝化所需的严格厌氧环境,使反硝化强度高于真实情况。野外原位测试大多采用乙炔抑制法,抑制了硝化过程,可能会低估反硝化强度。

(2) 本文统计的包气带反硝化强度多以分子态氮产量进行推算所得,而在田间情况下,所有硝酸盐还原的中间产物都有可能释出,不一定都还原成分子态氮,因此,可能会忽略硝化作用产生的 NO_3^- 和反硝化的中间产物 NO_2^- 、 NO ,从而对包气带反硝化强度造成影响。

(3) 缺少明确的不同采样深度的分组规则,本研究对采样深度的划分具有一定主观性,且所选文献的局限性以及数据的部分缺失等原因,都会直接影响整合分析的结果。

4 结论与建议

(1) 水平空间上,因相同深度不同生态类型环境因素的差异性,导致包气带反硝化强度存在一定的分布特征。0~0.5 m反硝化强度按由大到小排序为:森林、农田、草地、湿地、沙漠;0.5~1 m反硝化强度由大到小排序为:森林、农田、草地;1~3 m反硝化强度由大到小排序为农田、森林、草地;3~6 m反硝化强度由

大到小排序为农田、草地、沙漠。黏粒作为包气带介质重要组成成分,其含量对反硝化强度有显著影响,表现为反硝化强度随介质中黏粒含量的减小而减小;有机质、全氮及硝态氮作为反硝化的能源和氮源,其含量与包气带反硝化强度显著正相关。

(2)垂向空间上,不同生态类型下包气带反硝化强度随深度增加均呈“S”型变化趋势。受人类农业生产活动、土壤干湿变化以及凋落物累积等影响,有机物、氮素及反硝化微生物等在地表(0~0.5 m)大量富集,各生态类型下的反硝化强度均在此深度达到最大值;随深度增加,各生态类型的有机物与氮素等反硝化所需环境因素均有所减弱,导致反硝化强度在0.5~1 m处有所下降;受自养型反硝化微生物活动的影响,草地、农田、森林生态类型反硝化强度在地下1~3 m处达到次峰值;受垂向运移及生物地球化学过程的影响,各生态类型在地下3~6 m处的有机物与氮素含量急剧减小,反硝化强度也随之达到最小。

针对本研究发现的问题,提出以下建议:

(1)测试方法作为探究包气带反硝化强度的基础,而当前技术方法并不足以支撑包气带整体空间的研究,在今后反硝化研究推进过程中应首先解决测试方法这一难题。

(2)微生物多样性及活性作为影响包气带反硝化强度的主要因素,其与反硝化强度之间的规律并不明确。故在今后的研究中,应加强微生物对包气带反硝化强度影响的机理研究,同时需注重不同微生物种属之间交互作用的研究。

(3)受限于科学技术水平,目前对包气带硝化与反硝化之间互相作用的机理尚不明确,故仍应把硝化与反硝化之间的相互作用作为今后的主要研究方向之一。

参考文献:

- [1] 张云,张胜,刘长礼,等. 包气带土层对氮素污染地下水的防护能力综述与展望[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊1): 339-346. [ZHANG Y, ZHANG S, LIU C L, *et al.* Prospect of capability of aeration zone in soil in prevention nitrogen from pollution of groundwater [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(Sup1): 339-346. (in Chinese)]
- [2] 魏亮,郭华明,谢振华,等. 北京平原包气带典型沉积物对 NH_4^+ -N吸附特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 81-88. [WEI L, GUO H M, XIE Z H, *et al.* Adsorption characteristics of typical sediments from unsaturated zone of Beijing Plain, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 81-88. (in Chinese)]
- [3] 高业新,张冰,崔浩浩. 包气带水入渗过程中水化学组分运移规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 1-6. [GAO Y X, ZHANG B, CUI H H. A study of the migration of chemical compositions in vadose water infiltration [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 1-6. (in Chinese)]
- [4] Qin S, Hu C, Clough T J, *et al.* Irrigation of DOC-rich liquid promotes potential denitrification rate and decreases $\text{N}_2\text{O}/(\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2)$ product ratio in a 0-2 m soil profile [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 106: 1-8.
- [5] 潘田,张幼宽. 太湖流域长兴县浅层地下水氮污染特征及影响因素研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 7-12. [PAN T, ZHANG Y K. A study of nitrogen pollution in shallow groundwater and its affecting factors in Changxing county in the Taihu Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(4): 7-12. (in Chinese)]
- [6] Mckee C A, Jordan F L, Glenn E P, *et al.* Rapid nitrate loss from a contaminated desert soil [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 61(1): 119-136.
- [7] 陈哲,袁红朝,吴金水,等. 长期施肥制度对稻田土壤反硝化细菌群落活性和结构的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 5923-5929. [CHEN J, YUAN H C, WU J S, *et al.* Activity and composition of the denitrifying bacterial community respond differently to long-term fertilization [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5923-5929. (in Chinese)]
- [8] 邓焕广,陈振楼,张菊,等. 上海市典型城市河岸带不同植被类型下土壤反硝化作用研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1588-1594. [DENG H G, CHEN Z L, ZHANG J, *et al.* Study on soil denitrification under different vegetation types in typical coastal rivers in Shanghai [J]. Resour Environ Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1588-1594. (in Chinese)]
- [9] 程建华. 林下表面流湿地沉积物中硝化和反硝化过程研究[D]. 合肥:安徽大学, 2016. [CHENG J H. Study on sediment nitrification and denitrification in a surface-flow constructed wetland under poplar grove [D]. Hefei: Anhui University, 2016. (in Chinese)]
- [10] 张云,张胜,刘长礼,等. 包气带土层防护地下水污染的反硝化测定影响综述[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 114-119. [ZHANG Y, ZHANG S, LIU C L, *et al.* A review of influence of denitrification measurement in soil layers of aeration zone aimed at groundwater protection [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2): 114-119. (in Chinese)]

- [11] 王庆成,崔东海,王新宇,等. 帽儿山地区不同类型河岸带土壤的反硝化效率[J]. 应用生态学报, 2007,18(12):2681-2686. [WANG Q C, CUI D H, WANG X Y, *et al.* Soil denitrification rates in different type riparian zones in Maoershan mounlainous region of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12):2681-2686. (in Chinese)]
- [12] 孙志高,刘景双,杨继松,等. 三江平原典型小叶章湿地土壤硝化-反硝化作用与氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1):185-192. [SUN Z G, LIU J S, YANG J S, *et al.* Nitrification-denitrification and N₂O emission of typical calamagrostis angustifolia wetland soils in Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1):185-192. (in Chinese)]
- [13] Hobbie E A, Ouimette A P. Controls of Nitrogen Isotope Patterns in Soil Profiles[J]. Biogeochemistry, 2009, 95(2/3):355-371.
- [14] Peterson M E, Curtin D, Thomas S, *et al.* Denitrification in vadose zone material amended with dissolved organic matter from topsoil and subsoil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 61(6):96-104.
- [15] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen Limitation on Land and in the Sea: How Can It Occur? [J]. Biogeochemistry, 1991, 13(2):87-115.
- [16] 张超,陈艳,张宇飞,等. 基于多元线性回归模型的云南昭通地质灾害易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2016,43(3):159-163. [ZHANG C, CHEN Y, ZHANG Y F, *et al.* Geohazard susceptibility evaluation in Zhaotong of Yunnan based on the multivariate linear regression model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3):159-163. (in Chinese)]
- [17] Hanson C A, Fuhrman J A, Horner-Devine M C, *et al.* Beyond biogeographic patterns: processes shaping the microbial landscape [J]. Nature reviews Microbiology, 2012, 10(7):497.
- [18] Wrage N, Velthof G L, Beusichem M L V, *et al.* Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(12):1723-1732.
- [19] 裴宏伟,沈彦俊,刘昌明,等. 华北平原典型农田氮素与水分循环[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):283-296. [PEI H W, SHEN Y J, LIU C M, *et al.* Nitrogen and water cycling of typical cropland in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1):283-296. (in Chinese)]
- [20] 王常慧,邢雪荣,韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展[J]. 应用生态学报, 2004,15(11):2184-2188. [WANG C H, XING X R, HAN X G. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11):2184-2188. (in Chinese)]
- [21] Gasca D, Ross D. Utilização de balanços de água em zonas húmidas para relacionar processos hidrogeológicos e efeitos ecológicos[J]. Hydrogeology Journal, 2009, 17(1):115-133.
- [22] Nieder R, Schollmayer G, Richter J. Denitrification in the rooting zone of copped soils with regard to methodology and climate: a review[J]. Biology and Fertility of Soils, 1989, 8(3):219-226.
- [23] Colbourn P, Iqbal M M, Harper I W. Estimation of the total gaseous nitrogen losses from clay soils under laboratory and field conditions[J]. European Journal of Soil Science, 1984, 35(1):11-22.
- [24] Egginton G M, Smith K A. Losses of nitrogen by denitrification from a grassland soil fertilized with cattle slurry and calcium nitrate[J]. European Journal of Soil Science, 1986, 37(1):69-80.
- [25] Cannavo P, Richaume A, Lafolie F. Fate of nitrogen and carbon in the vadose zone: in situ and laboratory measurements of seasonal variations in aerobic respiratory and denitrifying activities[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(3):463-478.
- [26] Beggs R A, Hills D J, Tchobanoglous G, *et al.* Fate of nitrogen for subsurface drip dispersal of effluent from small wastewater systems [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2011, 126(1):19.
- [27] 高阳,申孝军,李新强,等. 间作群体内土壤呼吸和硝化-反硝化作用研究[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(2):16-19. [GAO Y, SHEN X J, LI X Q, *et al.* Study on soil respiration and nitrification-denitrification in intercropping [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(2):16-19. (in Chinese)]
- [28] 袁利娟,庞忠和. 包气带硝酸盐分布的差异性及其形成机理:以正定、栾城为例[J]. 水文地质工程地质, 2012,39(1):75-80. [YUAN L J, PANG Z H. Differences in nitrate distribution in the unsaturated zone and its formation mechanism: a case study of Zhengding and Luancheng [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1):75-80. (in Chinese)]
- [29] Legout C, Mole-t J, Lefebvre S, *et al.* Investigation of biogeochemical activities in the soil and unsaturated zone of weathered granite [J]. Biogeochemistry, 2005, 75(2):329-350.

责任编辑:汪美华