

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

兴隆水利枢纽对汉江河岸带氮素分布特征的影响

陈淑娴,尚睿华,冯予诚,王志强,马 腾

Effects of Xinglong Hydro-Junction on nitrogen distribution in the Hanjiang River riparian zone

CHEN Shuxian, SHANG Ruihua, FENG Yucheng, WANG Zhiqiang, and MA Teng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006056

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河南某大型裂隙岩溶水源地地下水位动态分析

A dynamic analysis of groundwater levels in a large fractured-karst groundwater wellfield in Henan 姜宝良,陈宁宁,李小建,潘登,张晓,姜英博 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 37-43

地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone 刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锟, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27–36

西北地区地下水水量--水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例

A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin

王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 17-24

永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River 胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11

塔城盆地地下水"三氮"污染特征及成因

Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater in the Tacheng Basin 吕晓立, 刘景涛, 周冰, 朱亮 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 42-42

赣江新干航电枢纽左库岸地下水浸没控制效果研究

Research on the control effects of groundwater immersion on the left reservoir bank of Xingan Navigation and Power Junction in Ganjiang River

张宇,任国澄,杨蕴,周志芳,郭生根,熊鸿强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 147-155



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006056

兴隆水利枢纽对汉江河岸带氮素分布特征的影响

陈淑娴^{1,2},尚睿华¹,冯予诚¹,王志强^{1,2},马 腾^{1,2} (1. 中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074;2. 生物地质与环境地质 国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:河岸带作为地表水和地下水的连接枢纽,主要通过反硝化等作用控制着二者之间的氮循环。水利工程会显著改变 河流区域水文环境,进而影响河岸带氮素的分布和循环,探明水利工程对河岸带氮循环的影响机制对了解区域氮素的控制 及利用具有重要意义。以兴隆水利枢纽为对象,在枢纽上、下游沉积物样品进行了总氮、"三氮"(铵态氮、亚硝态氮、硝态 氮)及相关土壤理化性质的分析。结果表明:(1)水利枢纽上游河岸带沉积物氮素含量显著高于下游,上游A剖面总氮、 "三氮"平均含量是下游B、C剖面的1.12~3.27倍;(2)水平方向上,3个剖面的河岸带的总氮、"三氮"含量变化具有相似 性,即同一剖面上总氮含量在堤内较高,且"三氮"含量均会在堤内靠近堤防的采样点发生突变(剧增或锐减);(3)垂向上总 氮、"三氮"分布规律相似,即0~60 cm 氮素含量迅速减少,60 cm 以下呈不规则变化,总体上氮素含量呈自上而下减少的趋 势。兴隆大坝主要影响其上游,通过蓄水抬升了上游河岸带地下水位,沉积物长期处于被淹没状态导致其脱氮能力下降。 此外,同一剖面由于堤防导致的微地貌差异,堤内的地下水埋深较堤外的浅,堤内沉积物脱氮能力弱于堤外。 关键词:河岸带;水利工程;地下水位;氮素;汉江;沉积物

中图分类号: P641; TV211 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2021)03-0182-09

Effects of Xinglong Hydro-Junction on nitrogen distribution in the Hanjiang River riparian zone

CHEN Shuxian^{1,2}, SHANG Ruihua¹, FENG Yucheng¹, WANG Zhiqiang^{1,2}, MA Teng^{1,2}
(1. School of Environment Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A riparian zone, as the junction of surface water and groundwater, mainly controls the nitrogen cycle between surface water and groundwater through denitrification and other actions. Water conservancy projects will significantly change the hydrological environment of river regions, and affect the distribution and circulation of nitrogen in riparian zones. Exploring the influence mechanism of water conservancy projects on the riparian nitrogen cycle is of great practical significance for understanding the control and utilization of regional nitrogen. In this paper, the Xinglong Hydro-Junction is taken as the object, and three riparian zone sampling sections are set up in the upper and lower reaches of the project, with five sampling points in each section. TN, "tri-nitrogen" (refers to NH_4^+ -N, NO_2^- -N, NO_3^- -N) and relevant soil physical and chemical properties are analyzed for the collected 150 soil samples. The results show that (1) the nitrogen content in the riparian sediments in the upstream of the water conservancy project is significantly higher than that in the downstream, and the average content of total nitrogen and "three nitrogen" in section A is 1.12-3.27 times that in sections B and C of the downstream. (2) The horizontal variation trend of contents of TN and "tri-nitrogen" in the riparian zones of the three sections is

收稿日期: 2020-06-29; 修订日期: 2021-02-19

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(2019040022);国家自然科学基金重点项目(41630318)

第一作者: 陈淑娴(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水污染防治方面的研究。E-mail: 764199550@qq.com

通讯作者:马腾(1972-),男,教授,主要从事地下水污染与防治、地下水与环境变化等研究。E-mail: mateng@cug.edu.cn

not consistent, showing that TN content in the same section is higher in the embankment, and the sampling point in the embankment close to the embankment is the abrupt change point (sharp increase or decrease) of "trinitrogen" content. (3) The vertical distribution pattern of TN and "tri nitrogen" is similar: nitrogen content decreases rapidly from 0 to 60 cm, and irregular change occurs below 60 cm. Nitrogen content decreases from top to bottom. The Xinglong Dam mainly affects its upper reaches. Through water storage, the groundwater level of the upstream riparian zone rises, and the sediments are submerged for a long time, leading to the decrease of denitrification capacity. Due to the difference in microgeomorphology caused by levee in the same section, the groundwater in the levee is deeper than that outside the levee, and the denitrification capacity of the sediments in the levee is weaker than that outside the levee.

Keywords: riparian zone; water conservancy project; groundwater level; nitrogen; Hanjiang River; sediment

河岸带是指与河水发生作用的陆地植被区域,是 河水-陆地交界处的两边,直至河水影响消失为止的地 带^[1]。河岸带作为连接水、陆生态系统的枢纽,可进 行物质、能量和信息的交换。河岸带生态环境具有地 下水埋深浅、动态性强、生物物理环境复杂等特点, 是氮循环的热点区域^[2],在控制氮素污染的输入和净 化河流水质方面具有重要作用。李锐等^[3]研究发现 长江上游江津段德感坝河岸带对总氮的拦截率为 45.05%; Peterjohn 等^[4]研究表明河岸带每年每公顷能 去除氮素 20~1 600 kg; Mariet 等^[5]的研究表明,森林 和草地类型植被构成的河岸带对总氮的去除率为 13%~99%。

水利工程在防洪、供水等方面所带来的社会经济 效益是显而易见的,但其导致生态功能下降的负面效 应却易被忽视。建造在河流上的水利工程破坏了河 流的连续性^[6];水坝调节了河流的流量和流速,蓄水发 电改变了水位,从而改变了河流的水文机制、传播过 程和地貌特征,进而引起了植被物种丰富度、植物组 成和分布的变化^[6]。同时,河流水文机制的变化会引 起土壤氧化还原等条件的改变,进而影响氮在土壤中 的转化^[7]。

研究河岸带沉积物中氮的含量分布特征是探明 河岸带氮循环的基础工作,具有显著的现实需求。氮 是土壤中重要的营养元素,可直接反映土壤所在生态 系统的营养状况,并且是全球氮循环的重要参与者^[8]。 河岸带沉积物是氮的主要源和汇,它既可以接受来自 水体沉降、颗粒物输运所埋藏的氮,也可以在合适条 件下释放分解氮使之进入水体进行循环^[9]。土壤的氮 浓度越高,其对水体氮的吸附能力就越弱,而向水体 释放氮的能力就越强^[10],所以查明沉积物中氮的含量 对研究河岸带的氮循环具有重要影响。

汉江流域农业发达,水系密集、湖泊河流交错分

布,然而由于农业氮肥长期且不合理使用,导致地下 水-沉积物系统中氮污染严重^[11-12]。此外,汉江流域 也是水利工程密集建设区,在丹江口水库下游段内, 已建、拟建9级水利枢纽,其中包括兴隆水利枢纽。 明确兴隆水利枢纽对汉江下游河岸带氮素分布的影 响,将对河库水质安全及水文生态环境的保护具有重 要意义。鉴于此,本研究选取汉江下游兴隆段河岸带 作为研究对象,沿大型水利工程(兴隆水利枢纽)上、 下游处布设河岸带采样区,采集沉积物样品,分析沉 积物中氮素含量及其土壤理化性质,查明汉江下游兴 隆段河岸带沉积物氮素含量及其分布特征。在此基 础上,探讨兴隆水利枢纽对河岸带氮素分布的影响, 旨在为受水利工程影响的河岸带生态保护提供科学 依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉江发源于陕西省宁强县, 是长江最长的支流, 全长1577 km, 流域面积159000 km²。汉江流域位于 亚热带季风气候区, 年均降水量804 mm, 总降水量的 75% 集中在5-10月的雨季; 年均气温12~16℃, 绝 对最高和最低温度分别为43℃和-13℃^[13]。汉江流 域西北高, 东南低; 从源头到丹江口水库的上游地区 具有典型的山地景观; 汉江中游地区一般的划分是从 丹江口至钟祥, 以低山丘岗地貌为主; 钟祥至汉口是 下游地区, 以冲积泛滥平原为主。汉江流域中下游水 系发达, 河网纵横交错, 湖泊众多, 地表水与地下水资 源丰富, 水力联系紧密。汉江流域下游地区受冲洪积 作用影响, 发育土壤多为砂土、壤土^[14], 渗透性高。

汉江中游的丹江口水库为南水北调工程的枢纽, 每年南水北调工程从汉江调水 95×10⁸ m³,导致汉水下 游水量减少,水体稀释能力下降。汉江下游以冲积平 原为主,农业和养殖业发达,氮肥输入过量,导致土壤 和水体中氮污染严重^[11-12,14]。

受南水北调工程影响,汉江中下游平均水位下降 0.5 m^[15]。为了保证汉江下游的水位及生态环境,在汉 江沙洋建设了兴隆水利枢纽和引江济汉工程。在汉 江下游已建和拟建的9级水利枢纽中,兴隆水利枢纽 是最后一级,属于南水北调中线汉江四项治理工程之 一,其建设将上游水位抬升并稳定至36.2 m^[16],用以保 障水利枢纽上游的生态水位和航运。引江济汉工程 每年从长江荆州段调水15×10⁸ m³,以提高汉江兴隆段 下游的水位,但引水量远远小于南水北调的调水量。 兴隆水利枢纽的建设导致上游蓄水,地下水位明显抬 升,下游水位明显降低,上下游高差约10 m(图1)。

兴隆段河岸带受南水北调和引江济汉两大工程 交汇作用,在汉江流域内极具代表性;同时,研究区河 岸带内分布有砂质壤土、壤质砂土和粉砂质壤土,基 本涵盖了汉江流域下游地区河岸带的各类土壤类型, 因此兴隆段河岸带是研究重大水利工程对河岸带氮 素分布影响的理想区域。

- 1.2 样品采集与测定
- 1.2.1 采样点布置

本研究于 2018 年 8 月(丰水期)在汉江兴隆段河 岸带进行采样。以兴隆水利枢纽为对象,在汉江兴隆 大坝上游(A 剖面)、兴隆大坝下游及引江济汉上游 (B 剖面)、引江济汉工程下游(C 剖面)设置 3 个河岸 带采样剖面,分别距兴隆大坝 0.5, 2.0, 15.0 km 远(图 2)。 因为汉江对地下水及沉积物的影响距离范围达 1.5 km 左右^[16],所以每个剖面单侧河岸带控制长度为 1.0~ 2.0 km,距汉江边缘由近及远布置 5 个采样点,相邻采 样点水平间距控制在 30~500 m。各采样点使用荷兰 钻,每 30 cm 采集一柱状沉积物样品直至潜水面,采样 点垂向控制深度在 1.2~4.5 m 之间(图 2)。

由图 2 可知,研究区河岸带沉积物岩性多为砂质 壤土、壤质砂土、粉砂质壤土、壤土、粉砂质黏土,渗







Fig. 2 Sampling site layout and sediment lithologic map of Xinglong section riparian zone of Han River

注: 左上角图来自文献 [17]。

透性高。样品采集于保鲜膜中,用铝箔纸包裹严密隔 绝空气并避光,装入真空袋中抽真空密封,储存于冷 冻袋制造的低温环境中,运输到实验室进行冷冻 保存。

1.2.2 测试方法

沉积物样品的氧化还原电位(Eh)在野外使用土 壞 ORP 计测定; 沉积物有机碳(TOC)使用 Vario TOC 总有机碳分析仪(Elementar,德国)测试; 总氮(TN)采 用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法; 铵态氮(NH₄-N)、亚硝态氮(NO₂⁻N)和硝态氮(NO₃⁻N)采用氯化钾 溶液提取-分光光度法(HJ 634—2012); 有机氮(ON) 由 TN 减去 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 所得; 沉积物含 水率用 105 ℃, 24 h 烘干法测定; 沉积物 pH 值以水为 浸提剂采用电位法(土水比为1:2.5)测定(NY/T 1377-2007); 粒度使用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)进行测定。每批样品的测定都根据相关测定标 准进行空白试验、平行样品和加标样品的测定,测试 结果符合各标准的质量保证和质量控制要求。

2 河岸带氮素空间分布特征

2.1 河岸带沉积物氮素含量及其统计学特征

河岸带沉积物 TN、NH⁴₄-N、NO⁻₂-N、NO⁻₃-N 含量 及其统计学特征见表 1, 研究区域"三氮"(NH⁴₄-N、 NO⁻₂-N、NO⁻₃-N)的空间差异相对于 TN 表现得非常显 著, 这是因为"三氮"容易受到环境因素的影响^[18]。

| | 表 1 河岸带沉积 | 物 TN、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N | 含量及其统计学特征 |
|---------|--|---|--|
| Table 1 | TN, NH_4^+ -N, NO_2^- -N, NNO_3^- -N | contents and their statistical | characteristics in riparian zone sedimen |

| | | A剖面 | B剖面 | C剖面 | 综合 |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|
| TN | 变化范围/(mg·kg ⁻¹) | 29.80 ~ 806.0 | 23.30 ~ 960.0 | 12.40 ~ 1 010 | 12.40 ~ 1 010 |
| | $W(平均值±标准差)/(mg·kg^{-1})$ | 282.0±168.0 | 251.0±189.0 | 199.0±202.0 | 242.0±190.0 |
| | 变异系数/% | 59.80 | 75.50 | 101.0 | 78.60 |
| NH ₄ ⁺ -N | 变化范围/(mg·kg ⁻¹) | 0.104 0 ~ 5.230 | 0.005 000 ~ 2.570 | 0.031 00 ~ 0.493 0 | 0.005 000 ~ 5.230 |
| | W(平均值±标准差)/(mg·kg ⁻¹) | 0.559 0±0.887 0 | 0.360 0±0.459 0 | 0.171 0±0.107 0 | 0.352 0±0.569 0 |
| | 变异系数/% | 157.0 | 128.0 | 62.30 | 162.0 |
| NO ₂ -N | 变化范围/(mg/kg) | 0.012 00 ~ 1.060 | $0 \sim 0.482 \ 0$ | $0.014\ 00 \sim 0.476\ 0$ | 0 ~ 1.060 |
| | $W(平均值±标准差/(mg·kg^{-1}))$ | 0.117 0±0.217 0 | 0.048 00±0.095 00 | 0.053 00±0.084 00 | 0.070 00±0.142 0 |
| | 变异系数/% | 186.0 | 199.0 | 157.0 | 203.0 |
| NO ₃ -N | 变化范围/(mg·kg ⁻¹) | 0~54.4 | 0~29.6 | 0.184 ~ 25.3 | 0~54.4 |
| | W(平均值±标准差)/(mg·kg ⁻¹) | 5.020±9.300 | 3.430±5.320 | 3.970±5.380 | 4.090±6.730 |
| | 变异系数/% | 185.0 | 155.0 | 135.0 | 165.0 |

由表1可以看出, 沉积物中无机氮含量表现为 NO₃⁻N> NH₄⁺N> NO₂⁻N, 可见NO₃⁻N 是沉积物中无机 氮的主要存在形式。NH₄⁺N 在硝化菌的作用下将转 化为NO₃⁻N^[19], 研究区域土壤环境为弱碱性(pH平均 值为 8.24), 有利于更多NH₄⁺N 转化为NO₃⁻N, 使得 NH₄⁺N 含量降低。NO₂⁻N 含量最低, 这是由于NO₂⁻ N 作为硝化和反硝化作用的中间产物, 极不稳定, 易 被氧化还原, 难以在陆地生态系统积累^[20]。

2.2 不同方向上河岸带沉积物氮素含量的变化2.2.1 TN含量在不同方向上的变化

纵向上,由表1可知,不同剖面之间TN含量表现 出的规律为:A剖面>B剖面>C剖面,处在兴隆大坝 上游的A剖面的TN平均含量分别是B、C剖面的 1.12倍和1.41倍。

在水平方向(横向)上,随着距河距离的增加, A 剖面沉积物 TN 含量在堤外呈先增加后减少的变化 规律,到堤内含量增加至峰值后减少(图3);B、C剖面TN含量均在堤外呈增加的趋势,到堤内增加至峰值后减少。虽然3个剖面在水平方向上的变化规律不同,但可以看出3个剖面中TN含量最大的采样点均在堤内,尤其是在表层土壤这个规律表现得更为明显,表明氮素在堤内积累较多。

从垂直剖面看,3个剖面不同采样点表层土壤 (0~30 cm)的 TN 含量都较高,绝大部分采样点 TN 含 量峰值出现在表层土壤中;到 30~60 cm 处,TN 含量 都迅速减少;60 cm 以下,TN 含量随着深度增加呈不 规则变化。总体而言,TN 含量随着深度的增加呈现 减少的趋势(图 3)。表层土壤 TN 高于其他土层的原 因在于表层土壤有较多氮的输入(人类活动氮排放、 植被凋落物、大气氮沉降等)^[21],导致氮的积累。

2.2.2 "三氮"含量在不同方向上的变化

纵向上,由表1可知,不同剖面之间无机态氮含量

表现出的规律为: NH⁴₄-N, A 剖面 > B 剖面 > C 剖面; NO⁻₂-N 和 NO⁻₃-N, A 剖 面 > C 剖 面 > B 剖 面 。 其中 A 剖面 NH⁺₄-N 的平均含量分别是 B、C 剖面的 1.55 倍和 3.27 倍, NO⁻₂-N 的平均含量分别是 B、C 剖面的 2.44 倍和 2.21 倍, NO⁻₃-N 的平均含量分别是 B、C 剖 面的 1.46 倍和 1.26 倍。不管是 TN 还是"三氮", 处在 兴隆大坝上游的 A 剖面氮素含量都大于下游的 B、 C剖面。

在水平方向上,随着距河距离的增加,A剖面 NH₄⁺-N含量在堤外含量变化较小,到堤内含量急剧增 加至峰值后减少(图4);B剖面在堤外NH₄⁺-N含量呈 增加趋势,到堤内含量锐减后增加;C剖面NH₄⁺-N含 量在堤外呈增加趋势,到堤内含量先减少后增加再减 少。A、B剖面沉积物NO₂⁻N含量在堤外呈先增加后







图 4 河岸带沉积物NH₄⁺-N、NO₇⁻-N、NO₃⁻-N 含量在水平和垂直方向上的变化



减少的趋势,到堤内含量急剧增加至峰值后减少; C剖面 NO₂⁻N含量变化规律与 NH₄⁺-N 变化规律一 致。A 剖面沉积物 NO₃⁻N 含量在堤外呈增加趋势,到 堤内含量减少后增加;B 剖面 NO₃⁻N 含量在堤外呈减 少趋势,到堤内含量继续减少再增加;C 剖面 NO₃⁻N 含量在堤外呈减少趋势,到堤内含量继续减少再增加;C 剖面 NO₃⁻N

值得注意的是, 在堤内离河最近的采样点, 不管 是NH₄⁺-N、NO₂⁻-N还是NO₃⁻-N, "三氮"含量在此处都会 发生突变。在兴隆大坝上游的 A 剖面, XL03 点 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 含量剧增, 而NO₃⁻-N 含量剧减; 在兴隆大坝 下游的 B 剖面, XL08 点 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量减少, 而 NO₂⁻-N 增加; C 剖面 XL12 点 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 含量减 少, 而 NO₃⁻-N 含量增加。

在垂直方向上,3个剖面的大多数采样点NH⁴-N、NO⁵₃-N、NO⁵₂-N含量表现的规律为:表层土壤含量较高,到30~60 cm 处减少;60 cm 以下,随着深度的增加,"三氮"含量呈不规则变化。虽然3个剖面都有个别采样点"三氮"峰值不在表层沉积物中,但总体上,沉积物中"三氮"含量呈减少的趋势(图4)。处在兴隆大坝上游A剖面堤内的采样点XL03的NH⁴₄-N、NO²₂-N含量较其他采样点要高很多,其中NH⁴₄-N峰值、均值含量是其他采样点的2.0~21.6 倍和3.5~29.7 倍,但NO³₃-N含量低于其他采样点。总体而言,在表层沉

积物中, NH₄⁺-N 含量较低, NO₃⁻N 含量较高, 是因为氧 气充足, 微生物活性强, 硝化作用较为剧烈, 导致大部 分NH₄⁺-N 氧化成NO₃⁻N。

3 讨论

3.1 兴隆大坝对河岸带氮素含量空间分布的影响

由图 5 可以看出,处在兴隆大坝上游的 A 剖面, 由于受到大坝蓄水的影响,河岸带地下水接受汉江的 补给,地下水位受大坝影响较明显,潜水位较处在兴 隆大坝下游的 B、C 剖面埋深浅。A 剖面沉积物的 TN 含量高于 B、C 剖面的,这是因为水库蓄水导致上游 地下水位抬升,大部分沉积物处于长期淹水的状态, 发生养分的积累^[22]。河岸带沉积物中的有机物质主 要来源于土壤原有机物的矿化和动植物残体的分解, 有机物质的输出则主要包括分解和侵蚀损失^[23]。沉 积物经常处于淹水状态,氧化还原电位低,形成大量 还原性物质,有利于有机质积累,国内外很多研究都 已经证明了这一点^[24-25],再加上渍水厌气,微生物活 动受阻,有机质分解减弱^[22]。研究区沉积物中的氮素 主要以有机态(平均值97%)存在,因此有机氮含量越 高, TN 量也越高^[22]。同理, 由于同时受到汉江堤防的 约束,大坝建设后会对堤内地势低平区域造成浸没影 $m^{[16]}$,所以A剖面TN含量最大的采样点在堤内(图3)。





值得注意的是, XL03 采样点的"三氮"含量变化特征与其他采样点具有较大的差异。这是因为 XL03 点位于兴隆大坝的上游 A 剖面, 因兴隆水利枢纽的蓄水作用, 使上游河岸带地下水位抬升, 同时位于堤内的XL03 相对高程较低, 低于堤外各点(图 5), 导致地下水埋深较浅(0.62 m), 土壤氧化还原电位均为负值(-4.0~-10 mV), 土壤处于还原状态, 不利于 NO₃-N的产生和积累^[26]。长期淹水条件下, 有机氮经厌氧

氨化微生物的作用, 矿化产物主要是 NH₄⁺-N^[27], 导致 NH₄⁺-N 的积累, 因此 NH₄⁺-N 的峰值出现在靠近潜水面 30~60 cm 的土层(图 4)。

位于兴隆大坝下游的 B、C 剖面,由于不在大坝库 区,河岸带地下水不接受汉江的补给,所以不受大坝 的影响。但是由于汉江堤防导致的微地貌差异,B、 C 剖面堤内的采样点 XL08、XL12 的潜水位埋深都是 同一剖面中最浅的,所以 TN 含量也是 B、C 剖面中最 高的。相对于 A 剖面堤内采样点受到水利工程和汉 江堤防约束的共同影响,采样点 XL08 和 XL12 潜水位 没有 XL03 的埋深浅,所以"三氮"特征并没有表现出 XL03 的规律。

3.2 土壤理化性质对河岸带氮素含量的影响

水利枢纽对氮素含量空间分布的影响是宏观尺度上的,而聚焦于每个采样点不同深度沉积物样品氮 素含量的变化,应与土壤理化性质有关,因为土壤理 化性质可通过改变影响氮循环的生物和非生物因素, 从而改变氮循环进程,导致氮素含量的变化^[18]。

3.2.1 对沉积物 TN 的影响

由表2可知,沉积物TN与ON呈极显著正相关,

沉积物 TN 中平均 97% 氮素都为 ON, 说明有机态氮 为沉积物中氮素的主要存在形态。TN 与 TOC 呈正相 关, TOC 和 TN 具有相同的变化趋势, 氮素的增加能促 进植物生长以增加有机碳的积累, 有机碳的分解可以 促进氮素的释放和转化^[28]。土壤 pH 能影响土壤氮素 的转化过程, 研究区土壤 pH 与 TN 呈负相关, 因为较 高的 pH 值会导致土壤硝化作用增强, 可能会增加氮 素的流失^[29]。沉积物 TN 含量与黏粒、粉粒含量呈正 相关, 与砂粒含量呈负相关。土壤的细颗粒物质有利 于有机氮在土壤中的存留; 而砂粒含量则易于有机氮 的解吸^[30]。

表 2 河岸带氮素含量与土壤理化性质相关性分析

| Fable 2 | Correlation a | nalysis of niti | ogen content | t and soil | physical and | l chemica | l properties i | n riparian zone |
|---------|---------------|-----------------|--------------|------------|--------------|-----------|----------------|-----------------|
|---------|---------------|-----------------|--------------|------------|--------------|-----------|----------------|-----------------|

| | ON | TOC | pН | Eh | 黏粒含量 | 粉粒含量 | 砂粒含量 | 土壤含水量 |
|--------------------------------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|
| TN | 0.999** | 0.949** | -0.500** | -0.163 | 0.363** | 0.298** | -0.347** | -0.036 0 |
| NH_4^+-N | 0.385** | 0.327** | -0.266** | -0.227** | 0.010 0 | 0.206* | -0.195* | 0.077 0 |
| NO ₂ ⁻ N | 0.574** | 0.576** | 0.289** | -0.030 0 | 0.035 0 | 0.248** | -0.240** | -0.240** |
| NO ₃ -N | 0.425** | 0.370** | -0.225 | -0.101 | 0.012 0 | 0.047 0 | -0.042 0 | -0.227** |

注:**表示在0.01水平显著相关;*表示在0.05水平显著相关。

3.2.2 对沉积物"三氮"的影响

由表2可知,"三氮"含量均与ON呈正相关,说明 沉积物中无机形态氮素含量会受到ON的氨化作用和 硝化作用的影响,氮素转化过程对不同形态氮素间的 关系具有较大的影响作用^[31],ON含量越高,所矿化生 成的"三氮"含量越高。TOC与"三氮"呈正相关,表明 有机质的分解是土壤"三氮"的重要来源^[31]。

NH⁴₄-N与粉粒含量呈正相关,与砂粒含量、土壤 pH、Eh呈负相关; NO⁻₂-N与粉粒含量、pH呈正相关, 与砂粒含量呈负相关; NO⁻₃-N与含水率呈负相关。土 壤表面带有负电,会吸附带有正电荷的铵根离子 (NH⁴₄),细颗粒物质具有较大的比表面积和电荷密度, 对NH⁴₄的吸附能力较强; pH升高, Eh值越大表明土壤 通气性越好,均会导致硝化作用增强^[29], NH⁴₄-N含量 减少。土壤硝化过程中,高 pH和细密质地的土壤有 利于NO⁻₂-N积累^[32]。NO⁻₃-N带有负电荷,使其不易被 土壤胶体吸附,易随水移动,土壤水分越多, NO⁻₃-N 越 易随水下移,造成NO⁻₃-N 的淋洗。

4 结论与建议

(1)本文系统分析了汉江兴隆段河岸带沉积物样 品中的氮素含量分布特征,发现大坝上游沉积物中TN、 "三氮"平均含量显著大于下游;在同一剖面上,在堤 内沉积物中 TN 含量高于堤外,并且堤内靠近堤防的 采样点是"三氮"含量的突变点(剧增或锐减);在沉积 物的垂向上,TN、"三氮"含量呈现自上而下减少的趋势。

(2)大坝蓄水使得大坝上游河岸带地下水位抬 升,使沉积物长期处于淹没状态,脱氮能力降低,导致 具有较高地下水位的上游沉积物中的氮素含量相对 较高。汉江堤防导致的微地貌差异使在同一剖面河 岸带堤内地下水位相对较高,所以堤内沉积物中的氮 素含量相对较高。另外沉积物氮素含量变化还受土 壤理化性质的影响,主要影响因素是有机质的含量, 有机质的分解促进氮素的释放。

(3)兴隆大坝蓄水会使库区河岸带沉积物脱氮能 力下降。从农业发展角度来看,沉积物氮素积累利于作 物的生长;但是从生态保护角度来看,沉积物积累的氮 素在水分淋滤、流动作用下,会增加水体氮污染的风险。

(4)应加强汉江下游河岸带土壤环境的管理:一 方面严格控制农田、园地的氮肥使用量,使用有机氮 肥代替无机氮肥,采用喷灌等节水浇灌方法;另一方 面应维持或恢复河岸带的缓冲带功能,运用生物、生 态工程的技术与方法,使河岸带生态系统的结构、功 能和生态学潜力尽可能地恢复到原有的或达到更高 的水平。

参考文献(References):

- GREGORY S V, SWANSON F J, MCKEE W A, et al. An ecosystem perspective of riparian zones [J]. Bioscience, 1991, 41(8): 540 551.
- [2] VIDON P, ALLAN C, BURNS D, et al. Hot spots and hot moments in riparian zones: potential for improved water quality management[J]. Jawra Journal of the American Water Resources Association, 2010, 46(2): 278 – 298.
- [3] 李锐,牛江波,杨超,等.长江上游江津段河岸带对陆源氮磷的拦截作用研究[J].西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(10): 11 19. [LI Rui, NIU Jiangbo, YANG Chao, et al. Study on the interception of riparian to nitrogen and phosphorus at Deganba of Jiangjin in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2017, 39(10): 11 19. (in Chinese)]
- [4] PETERJOHN W T, CORRELL D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed : observations on the role of a riparian forest[J]. Ecology, 1984, 65(5): 1466 – 1475.
- [5] HEFTING M M, CLEMENT J, BIENKOWSKI P, et al. The role of vegetation and litter in the nitrogen dynamics of riparian buffer zones in Europe[J]. Ecological Engineering, 2005, 24(5): 465 – 482.
- [6] SUN R, DENG W Q, YUAN X Z, et al. Riparian vegetation after dam construction on mountain rivers in China[J]. Ecohydrology, 2014, 7(4): 1187 – 1195.
- [7] 郭劲松,黄轩民,张彬,等. 三峡库区消落带土壤有机 质和全氮含量分布特征[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2):
 213 - 219. [GUO Jinsong, HUANG Xuanmin, ZHANG Bin, et al. Distribution characteristics of organic matter and total nitrogen in soils of water-levelfluctuating zone of Three Gorges Reservoir area[J]. Journal Lake Sciences, 2012, 24(2): 213 - 219. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 孔涛,张德胜,寇涌苹,等. 浑河上游典型植被河岸带 土壤有机碳、全氮和全磷分布特征[J]. 土壤, 2014, 46(5): 793 - 798. [KONG Tao, ZHANG Desheng, KOU Yongping, et al. Soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus distribution of typical vegetation riparian zones in upper reaches of Hun River[J]. Soils, 2014, 46(5): 793 - 798. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张雷,秦延文,郑丙辉,等. 三峡入库河流大宁河回水 区浸没土壤及消落带土壤氮形态及分布特征[J]. 环 境科学, 2009, 30(10): 2884 - 2890. [ZHANG Lei, QIN Yanwen, ZHENG Binghui, et al. Nitrogen forms and its distribution character in immerged and water-levelfluctuating zone soils of the backwater reach from input river of Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2009, 30(10): 2884 - 2890. (in)

Chinese with English abstract)

- [10] 袁辉,王里奥,胡刚,等. 三峡库区消落带受淹土壤氮 和磷释放的模拟实验[J].环境科学研究, 2008, 21(1): 103 - 106. [YUAN Hui, WANG Li'ao, HU Gang, et al. Release of N, P from submerged soil in the shore-area of Three Gorges Reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(1): 103 - 106. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 邓青军,唐仲华. 江汉平原水土地质环境综合监测与 评价[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 131-135.
 [DENG Qingjun, TANG Zhonghua. Soil-groundwater geological environment integrated monitoring and evaluation in Jianghan Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 131 - 135. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李圣品,李文鹏,殷秀兰,等. 全国地下水质分布及变化特征[J].水文地质工程地质, 2019, 46(6):1-8.
 [LI Shengpin, LI Wenpeng, YIN Xiulan, et al. Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to 2017[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6):1-8. (in Chinese with English abstract)]
- LIU W Z, XIONG Z Q, LIU H, et al. Catchment agriculture and local environment affecting the soil denitrification potential and nitrous oxide production of riparian zones in the Han River Basin, China[J]. Agricultural Ecosystems & Environment, 2016, 216: 147 154.
- [14] 陈江军,刘波,蔡烈刚,等.基于多种方法的土壤重金属污染风险评价对比——以江汉平原典型场区为例[J].水文地质工程地质,2018,45(6):164-172.
 [CHEN Jiangjun, LIU Bo, CAI Liegang, et al. Comparison of risk assessment based on the various methods of heavy metals in soil: a case study for the typical field areas in the Jianghan Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 164 172. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王丽. 鄂豫陕交界地区生态环境保护与管理[J]. 中国 经贸导刊, 2015(22): 60 - 61. [WANG Li. Ecological environment protection and management in the border area of Hubei, Henan and Shanxi[J]. China Economic & Trade Herald, 2015(22): 60 - 61. (in Chinese)]
- [16] 张长征,黄家文,李凯,等.汉江兴隆水利枢纽库区两 岸浸没治理[J].人民长江,2009,40(22):23-24.
 [ZHANG Changzheng, HUANG Jiawen, LI Kai, et al. Immersion treatment on the banks of Xionglong Hydropower Project on the Hanjiang River[J]. Yangtze River, 2009, 40(22):23-24. (in Chinese)]
- [17] XIONG Z Q, GUO L D, ZHANG Q F, et al. Edaphic conditions regulate denitrification directly and indirectly by altering denitrifier abundance in wetlands along the

Han River, China[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(10): 5483 – 5491.

- [18] 曾凯,刘琳,蔡义民,等.地下生态系统中氮素的循环及影响因素[J].草业科学,2017,34(3):502-514.
 [ZENG Kai, LIU Lin, CAI Yimin, et al. The nitrogen cycle and factors affecting it in the belowground ecosystem[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(3):502-514. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杜宁宁,郭晋平,陈东莉.河岸带落叶松林土壤氮素空间格局研究[J].山西林业科技,2011,40(1):4-6.
 [DU Ningning, GUO Jinping, CHEN Dongli. Spatial pattern of soil nitrogen in the riparian zone of larch forest[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2011,40(1):4-6. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 崔楠, 吕光辉, 刘晓星, 等. 胡杨、梭梭群落土壤理化 性质及其相互关系 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 476 - 482. [CUI Nan, LV Guanghui, LIU Xiaoxing, et al. Soil physical-chemical properties of populus euphratica and haloxylon persicum communities and their relationship[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 476 -482. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈敏, 刘建虎, 叶成林, 等. 河岸带对氮磷的截留转化 作用[J]. 云南农业, 2017(9): 77 - 80. [CHEN Ming, LIU Jianhu, YE Chenglin, et al. The interception and transformation of nitrogen and phosphorus in riparian zone[J]. Yunnan Agriculture, 2017(9): 77 - 80. (in Chinese)]
- [22] 常超,谢宗强,熊高明,等. 三峡水库蓄水对消落带土 壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1236-1244. [CHANG Chao, XIE Zongqiang, XIONG Gaoming, et al. The effect of flooding on soil physical and chemical properties of riparian zone in the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(7): 1236-1244. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 白军红,邓伟,张玉霞,等.洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J].环境科学,2002,23(2): 77-81. [BAI Junhong, DENG Wei, ZHANG Yuxia, et al. Spacial distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen in the natural floodplain wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2002, 23(2): 77-81. (in Chinese with English abstract)]
- [24] SAHRAWAT K L. Organic matter accumulation in submerged soils[J]. Advances in Agronomy, 2003, 81: 169-201.
- [25] 董元华, 徐琪. 水成土壤演化中有机质含量变化的研究[J]. 生态学报, 1990, 10(4): 323 327. [DONG Yuanhua, XU Qi. Study on changes in organic matter content in the succession of hydro-morphic soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 1990, 10(4): 323 327. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 孙志高,刘景双.湿地土壤的硝化-反硝化作用及影响

因素 [J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1462 – 1467. [SUN Zhigao, LIU Jingshuang. Nitrification-denitrification and its affecting factors in wetland soil-A review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(6): 1462 – 1467. (in Chinese with English abstract)]

- [27] 金相灿,崔哲,王圣瑞.连续淹水培养条件下沉积物和土壤的氮素矿化过程[J].土壤通报,2006,37(5):909-915. [JIN Xiangcan, CUI Zhe, WANG Shengrui. Nitrogen mineralization processes of sediments and soil under continuously waterlogged incubation conditions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(5):909-915. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 白军红,欧阳华,邓伟,等.湿地氮素传输过程研究进展[J]. 生态学报,2005,25(2):326-333. [BAI Junhong, OUYANG Hua, DENG Wei, et al. A review on nitrogen transmission processes in natural wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2):326 333. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 王勤,刘广军,张凯,等. 合肥老城区绿地土壤pH和氮磷的空间变异特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(8): 1173 1178. [WANG Qin, LIU Guangjun, ZHANG Kai, et al. Spatial variability of soil pH, nitrogen and phosphorus of urban Greenland in central Hefei[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(8): 1173 1178. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 赵清贺,刘倩,马丽娇,等.黄河中下游典型河岸带土 壤性质空间变异及其对环境的响应[J].应用生态学 报,2015,26(12):3795 - 3802. [ZHAO Qinghe, LIU Qian, MA Lijiao, et al. Spatial variation in riparian soil properties and its response to environmental factors in typical reach of the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3795 - 3802. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 王智,陈刚亮,李建华.崇明岛不同类型河岸带土壤碳 氮分布特征[J].安徽农业科学, 2013, 41(22): 9266 – 9269. [WANG Zhi, CHEN Gangliang, LI Jianhua. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen in different riparian zones in Chongming Island[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(22): 9266 – 9269. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 冉炜,沈其荣,郑金伟,等. 土壤硝化作用过程中亚硝态氮的累积研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 474 481. [RAN Wei, SHENG Qirong, ZHENG Jinwei, et al. Nitrite accumulation in the process of nitrification in different agricultural soils of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 474 481. (in Chinese with English abstract)]