

狗牙根与空心莲对水库消落带土壤氮磷释放影响的模拟

吕凤玲¹, 欧阳炜², 宋艳墩¹, 蔡崇法¹, 郝蓉¹, 王军光¹

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 江西省万载县农业局, 江西 宜春 336100)

摘要: 通过水库水位涨落室内模拟试验, 探究丹江口库区消落带优势物种狗牙根和空心莲2种草本植物对土壤氮磷释放过程影响。结果表明: (1) 水淹结束后(32天), 空心莲子草土壤TN、TP分别降低11.75%, 25.28%, 狗牙根分别降低3.62%, 25.77%。(2) 干湿交替环境主要影响土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和AP的含量的变化, 对土壤中的TN、TP含量的影响较小。(3) 狗牙根的死亡增加土壤TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP量, 即不耐淹植被过滤带虽然能净化径流中N、P等污染物, 但截留的污染物和植物吸收的养分随着植物体的分解再次进入水体或土壤, 无法达到有效防控农业面源污染的目的。该研究为丹江口水库利用植被缓冲带防控水体富营养化提供一定理论依据。

关键词: 消落带; 水淹; 狗牙根; 空心莲; 氮释放; 磷释放

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0240-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.036

Simulation Study on the Effects of *Cynodon dactylon* and *Alternanthera philoxeroides* on Soil Nitrogen and Phosphorus Release in the Reservoir Water-level Fluctuation Zone

LÜ Fengling¹, OUYANG Wei², SONG Yantun¹, CAI Chongfa¹, HAO Rong¹, WANG Junguang¹

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2. Wanzai County Agricultural Bureau of Jiangxi Province, Yichun, Jiangxi 336100)

Abstract: In order to determine the effects of herbaceous plants on the release process of soil nitrogen and phosphorus, a simulation experiment of reservoir water level fluctuation was conducted under *Cynodon dactylon* and *Alternanthera philoxeroides*. The results showed that: (1) After the end of flooding (32 days), the soil total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) decreased by 11.75% and 25.28%, respectively in *Alternanthera philoxeroides*, and by 3.62% and 25.77%, respectively in *Cynodon dactylon*. (2) The dry-wet alternative environment mainly affected the changes of ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) and available phosphorus in the soil, and had little effect on TN and TP contents in the soil. (3) The death of *Cynodon dactylon* increased the amount of soil TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TP, indicating that the inundated vegetation filter belt could purify N, P and other pollutants in the runoff. However that part of nutrients absorbed by the plants would in turn release to water system by the decomposition of plant biomass. The decomposition of the plant biomass once again entered into the water system or the soil, and thus the purpose of effectively preventing and controlling agricultural non-point source pollution could not be achieved. This study provides a theoretical basis for the using of vegetation buffer zone to prevent and control the eutrophication of water system in the Danjiangkou Reservoir.

Keywords: water-level fluctuation zone; flooding; *Cynodon dactylon*; *Alternanthera philoxeroides*; nitrogen release; phosphorus release

消落带是受控水库因周期性水位涨落, 在最高水位线与最低水位线之间土地淹没或露出而形成的区域, 它是水库周期性蓄洪、行洪等引起水库的一种特有现象^[1-3]。周期性反季节水淹会影响土壤状况, 水

淹前后不同土层中的养分、微生物、植物等有显著差异, 其中淹水期间部分植物体淹没腐解并释放氮磷, 加之水库水体流速缓慢, 氮、磷元素进入水体不易稀释扩散^[2], 可以促进水体富营养化^[4], 给水生态安全

带来潜在风险。因此,随着水库水位的长期涨落,消落带土壤养分匮乏和水体富营养化问题将日益突显。

丹江口水库是南水北调中线工程水源区,水库水质好坏直接关系到水库生态安全和受水区的生活用水以及沿线生态环境和农业用水问题^[5]。已有研究^[6-8]表明,缓冲区植物(通常包括树草和湿地植物)生长增加了底质氮赋存,对底质总磷释放具有显著的抑制作用,同时降低了潜在污染物与接纳水体之间的联系,提供了一个阻止污染物输入的生化 and 物理障碍带,故能有效去除水中 N、P 和有机污染物,是目前控制水体富营养化最有效的方式。Heathwaite 等^[7]研究表明,河岸植被缓冲带对 TN 和 TP 平均去除率分别为 70%~95%和 70%~98%,对农业面源污染治理具有很好的效果。不同植物对水体富营养化缓解效果也有差异,杨文航等^[8]研究狗牙根草地土壤氮磷含量发现,作为丹江口消落带优势物种,狗牙根土壤营养元素周转速率快于裸地。邝臣坤等^[9]模拟了周调节水库的消落情况,发现周调节水库消落带上狗牙根的各项形态指标均明显低于岸坡未受淹的植株,且狗牙根在水淹 14 天后会出现死亡,水淹结束后会部分复绿。然而,水淹胁迫对空心莲子草株高具有促进

作用,随着水淹胁迫梯度的增加,空心莲子草高度呈增加趋势^[10],空心莲子草的生长能有效转化土壤中氮磷,降低水体氮磷含量。狗牙根和空心莲子草是丹江口库区消落带自然萌发生长的优势群落类型,作为环境修复植被前后期人工参与较小,资金投入少,如果能够在较少的投入下,产生较大的生态效益则十分有利。因此有必要探究水淹情况下狗牙根与空心莲子草对土壤氮磷转化的影响。

本试验选取丹江口库区消落带有代表性优势物种空心莲子草和狗牙根,进行消落带水文变化模拟,观测植物生长及土壤氮磷变化规律,拟探明 2 种植物与水文条件相互作用对消落带土壤中氮磷影响,为利用狗牙根和空心莲子草减轻消落带水体富营养化提供依据。

1 材料与方法

试验供试植物为丹江口库区消落带优势物种狗牙根和空心莲子草。供试土壤于 2016 年 9 月采于丹江口库区的习家店镇果茶场(北纬 32°43′15.32″,东经 111°08′23.95″,高程 155 m)消落带表层 0—20 cm,土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

全氮/ (g·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	机械组成/%			土壤 质地	pH
					<0.002 mm	0.05~0.002 mm	2~0.05 mm		
1.07	2.78	15.52	0.58	23.70	47.78	49.57	2.65	粉质黏土	6.74

试验土槽为 3 mm 钢板可移动土槽,共 5 个,分别为裸地土槽(1 个)、狗牙根土槽(2 个)、空心莲子草土槽(2 个);土槽规格为 4.0 m(长)×0.5 m(宽)×0.25 m(深),其中植被过滤带长 3 m,各土槽植被过滤带依次均匀划分为 A、B、C、D 4 个区域。土槽坡度 11°,底部小孔直径 3 mm,正方形排列,间距 10 cm。土槽底端设汇流口收集径流和泥沙。

填装土槽前将土壤过 2 mm 筛,土槽底部铺厚 3 cm 河沙后将土壤以 5 cm 分层填装,填土深 20 cm,轻微敲紧实。于 2017 年 5 月 29 日均匀洒播狗牙根种子,平均播种量为 2 g/m²;于 2017 年 6 月 5 日种植空心莲子草幼苗,密度为 400 株/m²,播种完毕后将土槽置于自然条件生长,观察狗牙根的发芽、出苗以及空心莲子草成活率等情况,定期浇水养护,除杂草等,待植物株高超过 25 cm 时进行试验。

将土槽分别置于尺寸 4.60 m(长)×4.20 m(宽)×1.20 m(高)水池中,根据丹江口水库水位实际调度情况,本试验 1 个完整水位涨落周期为 36 天。水位涨落频率 4 d/次,水池水深依次为 45,60,75,90 cm,水位依次上涨到 A、B、C、D 区顶端(图 1)。到最高

水位后,水位依次下降,以此模拟消落带区域的水位变动。

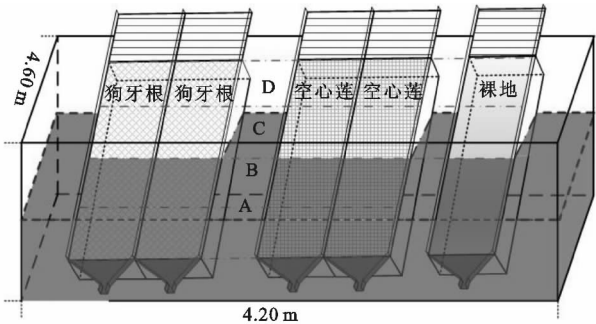


图 1 植被水淹装置示意

试验开始前在狗牙根、空心莲植被各区域分别随机选取 10 棵植株并作标记,每次水位涨落前量取茎长,试验结束后割取植被地上部分,烘干并分别称取各区域植被干重。每次量取茎长后对各区域土壤采用 5 点采样法取样并分别混匀,用 4 分法把混匀后土样分为 2 份,一份放置阴凉处自然风干,用于测定样品中总氮(TN),总磷(TP)与速效磷(AP)含量;另一份放入冰箱冷冻,用于测定土壤样品中铵态氮(NH₄⁺-N)与硝态氮(NO₃⁻-N)含量。

运用 SPSS 20.0 软件对不同处理各时段土壤氮

磷含量进行统计分析,运用 OriginPro 2018 软件绘图和曲线拟合。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对各区域水位上涨期(0~16 天)及水位下降期(16~32 天)土壤 TN 、 TP 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量变化率进行显著性检验,用最小显著法(LSD)进行多重比较,显著水平 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 植被生物量变化

由图 2 可知,各区域空心莲子草茎长随时间线性增长($y = ax + b$, $R^2 > 0.98$)。式中: x 为生长时间(d); y 为茎长(cm);各区域参数 a 分别为 2.57, 2.21, 1.70, 1.20。水位变化前期(0~4 天)各区域空心莲子草茎长增长率基本相同,约为 20%,第 8 天后开始分化,A 区域茎长明显大于其他区域。由于空心莲子草具有较强的耐淹性,水位上升对空心莲子草的茎长增长有极大的促进作用,而 A 区域水淹时间最长,故 A 区域茎长最长;但全淹会降解光合色素、破坏保护酶系统,从而导致生物量的减少,而 A 区域水深最大,植株处于全淹状态,故 A 区域干重最小。狗牙根的生长受水位变化影响严重,A 至 D 区域干重依次减小,且各区域干重小于空心莲子草。在水位变化前期(0~12 天),各区域狗牙根茎长变化基本一致,随后除 C 区域外,植株茎长受到不同程度抑制,其中 A、B 区域植株茎长基本停止增长。C 区域茎长较其他区域长,原因是此时 C 区域只有未完全被水淹没且生长速度较快狗牙根才能存活。观察发现,D 区域狗牙根虽然植株茎长较 C 区域短小,但整体长势优于其他区域,这是因为该区域受水淹胁迫最晚且时间较短,植株长势基本不受影响。

2.2 植被—水位对土壤氮释放影响

2.2.1 植被—水位对全氮释放影响 由图 3 可知,裸地 A 区域在水淹早期(0~4 天)TN 含量减少 6.24%,达 0.83 g/kg,随后上升,至 12 天达到最大(0.91 g/kg),16 天之后趋于稳定(0.87 g/kg)。裸地 C 区域 TN 含量在试验初期(0~16 天)降低 6.75%至最低(0.86 g/kg),之后基本保持平衡。狗牙根各区域在初期(0~12 天)生长较快(图 2),消耗大量土壤养分,故此时土壤 TN 明显降低。至 12~28 天,A、B、C 区域蓄水,部分狗牙根经水淹死亡腐解,A、B、C 区域 TN 含量分别上升 13.53%, 11.20%, 5.61%,达到最大含量(1.02, 0.96, 0.94 g/kg)。由此,不耐淹植被过滤带虽然能净化径流中氮磷等污染物,但截留的污染物和植物吸收的养分随植物体分解再次进入水体或土壤,无法达到有效防控农业面源污染的目的。淹水—落干期间(0~36 天),水淹并未导致空心莲子草大量死亡腐解,提高土壤 TN 含量;相反,空心莲子草茎长增长率保持稳定(图 2),空心莲子草在水淹中后期为应对水淹胁迫而大量消耗土壤中 N 素

养分以供生长,故各区域 TN 含量呈总体下降趋势。与空心莲子草相比,狗牙根在水淹过程中各区域出现了不同程度的死亡,且存活的狗牙根生长较空心莲子草慢,故空心莲子草土壤 TN 含量降低较狗牙根与裸地各区域明显,至周期结束时(第 36 天),相比其他区域,A 区域水淹时间最长,TN 含量变化差异最显著,空心莲子草 TN 下降率(13.71%)是狗牙根 14.23 倍,裸地 3.73 倍,相比不耐淹植被,耐淹植被在水位涨落期间可有效减少土壤 TN 含量。各处理 D 区域 TN 都缓慢降低,裸地 TN 含量降低 7.49%,狗牙根、空心莲子草生长会带来底质氮释放的增加,TN 含量降低更明显,其中狗牙根降低 13.79%,空心莲子草降低 13.48%(表 2)。

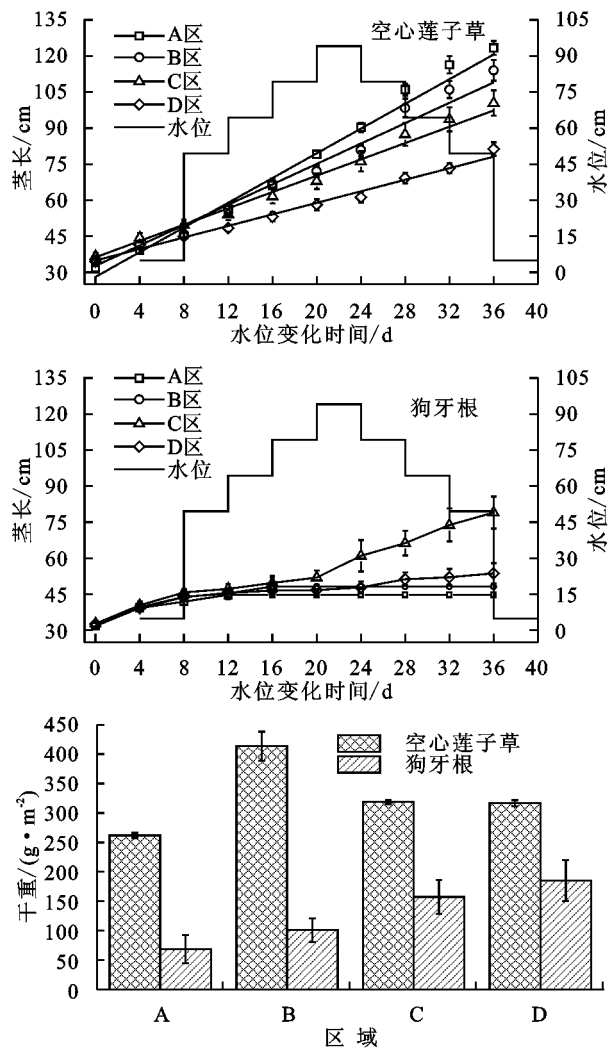


图 2 水淹—落干周期 2 种植物生物量变化

2.2.2 植被—水位对硝态氮释放影响 无机氮极易通过淋溶、地表径流、漫滩水位波动和淹水胁迫等作用进入水体,进而增加水体富营养化等潜在风险^[11-13]。反硝化是通过反硝化细菌参与的减少土壤和地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的最重要的生物化学反应^[14]。许多研究^[2,14]认为,植被过滤带可通过植物吸收和反硝化作用转换和固定氮素,以有效降低土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量。由图 3 可知,裸地与空心莲子草土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化趋势基本

一致。Shang 等^[15]研究发现,NO₃⁻-N 带负电荷且溶水性强,易进入水体,且水淹时间越长 NO₃⁻-N 含量下降越多^[16-17],本研究水位变化初期(0~12 天),A、B、C 区淹水时间依次降低,D 区未淹水,因此 A 区至 D 区 NO₃⁻-N 含量下降率依次减小,分别为 79.93%,77.77%,75.55%,13.93%。对不同处理 NO₃⁻-N 变化量进行单因素方差分析表明,水位淹水一落干期间狗牙根与空心莲子草、裸地差异显著。第 8~12 天,狗牙根各区域 NO₃⁻-N 分别急剧下降 62.29%,62.91%,68.34%,72.31%,此时水位上涨至 B 区域,A、B 区域蓄水,土壤处于厌氧环境,部分狗牙根经水淹死亡,植株体腐解导致土壤有机物含量增加,促进了土壤微生物的反硝化作用^[18]。第 32~36 天,水位落干,狗牙根部分复绿,有氧环境促进了微生物硝化反应^[8],狗牙根各区域 NO₃⁻-N 分别上升 9.87%,100.22%,111.70%,89.01%。水淹使空心莲子草 A、B 区域处

于缺氧环境,植物为逃脱水淹胁迫会加快茎的伸长生长和不定根的形成来获取外界的氧,这些过程会消耗大量储能,根据 Panda 等^[19]的研究,此时耐淹植物维持活力的能源主要靠厌氧代谢途径,如硝酸盐还原作用等,来提供维持植物在低氧环境下各项正常生理功能与内部环境所必要的能量,故 A、B 区域 NO₃⁻-N 含量有较大下降(74.70%,76.54%)。水位变化末期(32~36 天)水槽落干,促进了土壤中好氧细菌硝化作用,抑制了厌氧细菌反硝化作用^[2],且植被根系生长提高了土壤通透性^[14,20],故植被土壤 NO₃⁻-N 含量有较大上升;水淹时间越长,失去淹水保护后暴露于空气中硝化速率越快,故 A-D 区域 NO₃⁻-N 上升率依次增大。而空心莲子草存活率高于狗牙根,土壤通透性也较狗牙根好,各区域 NO₃⁻-N 含量急剧上升(295.66%,249.27%,220.45%,140.09%),上升幅度较狗牙根大。

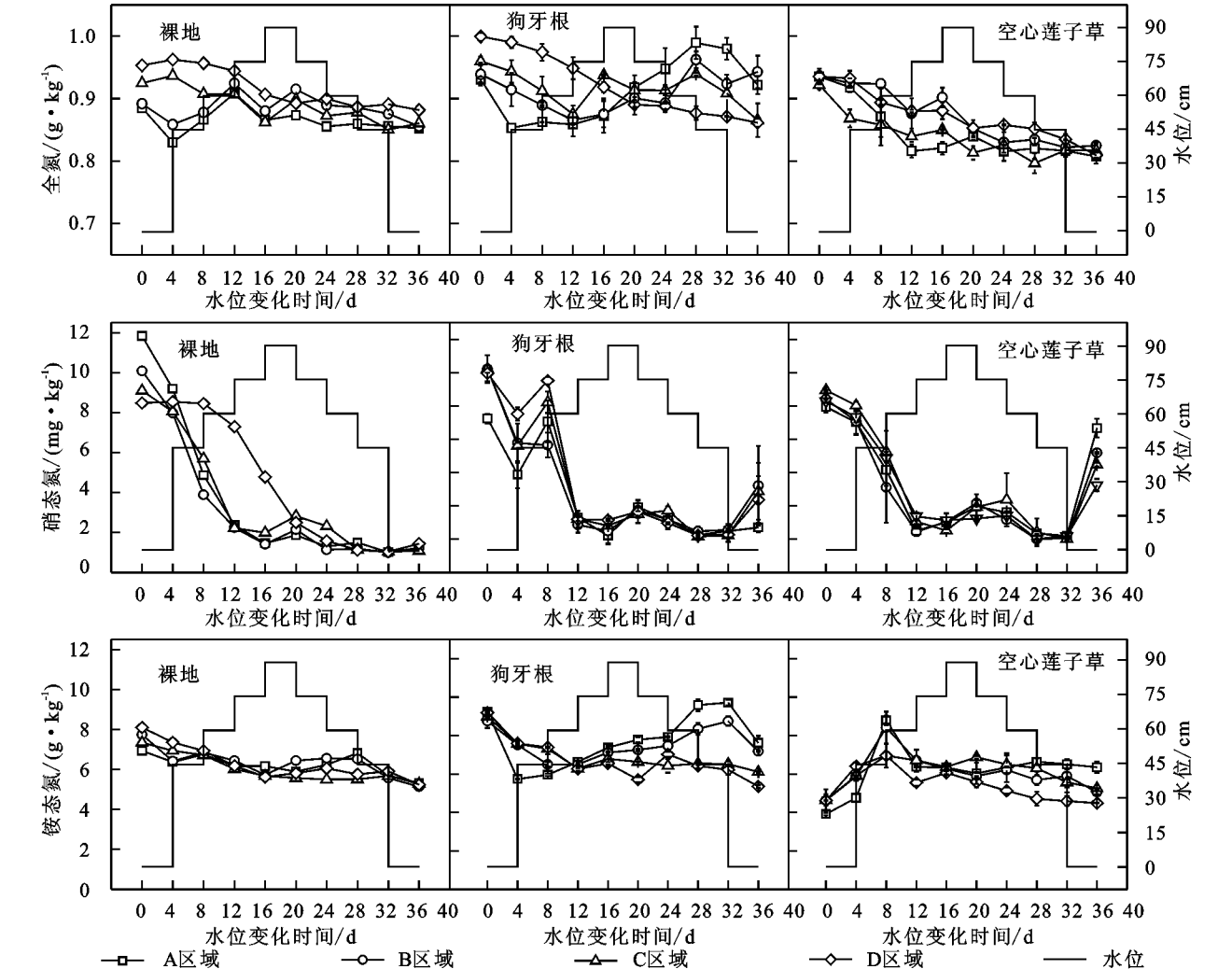


图3 水淹一落干周期各区域土壤氮含量变化

2.2.3 植被—水位对铵态氮释放影响 由图3和表3可知,水槽淹水一落干期间不同植被 NH₄⁺-N 差异极显著。8~32 天,土壤处于水淹状态,狗牙根 A、B 区域 NH₄⁺-N 分别缓慢增加 63.22%,34.6%。根据林俊

杰等^[2]的研究,淹水培养时,厌氧微生物迅速繁殖并将沉积物中有机氮分解为铵态氮,故 A、B 区域有缓慢增加。C、D 区域土壤 NH₄⁺-N 在第 12 天转化达到平衡,含量分别基本保持在 6.28,6.27 mg/kg。第 32~36 天,

水位落干,部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过 NH_3 的形式挥发而损失^[14],各区域 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分别降低 21.57%,17.87%,6.37%,13.69%。第 0~8 天,水位上升至 B 区域,缺氧条件下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 无法向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化,且 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 带正电荷易被沉积物吸附,不易流失^[14],空心

莲子草 A、B 区域 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别快速上升 124.20%,82.16%,由于 A 水淹时间较 B 长,故 A 上升率较 B 高。第 8~36 天,由于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量累积对微生物的生长具有抑制作用^[8],各区域 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别缓慢降低 27.78%,39.28%,23.82%,35.43%。

表 2 不同处理间各个区域土壤全氮分析

处理	A 区域		B 区域		C 区域		D 区域	
	最高水位	落干	最高水位	落干	最高水位	落干	最高水位	落干
裸地	0.86±0.03a	0.87±0.02b	0.88±0.04a	0.89±0.03a	0.86±0.02b	0.92±0.03a	0.91±0.02a	0.91±0.06ab
狗牙根	0.87±0.05a	0.91±0.05a	0.87±0.02b	0.91±0.03a	0.94±0.03a	0.91±0.03a	0.92±0.03a	0.92±0.05a
空心莲子草	0.82±0.02b	0.85±0.05b	0.90±0.03a	0.85±0.05b	0.85±0.02b	0.84±0.04b	0.88±0.02b	0.87±0.04b

注:不同字母表示同一区域不同处理差异显著($p<0.05$)。

表 3 不同处理间各个区域土壤铵态氮分析

处理	A 区域		B 区域		C 区域		D 区域	
	最高水位	落干	最高水位	落干	最高水位	落干	最高水位	落干
裸地	5.89±0.56b	6.33±0.42b	6.43±0.63ab	6.47±0.62ab	5.57±0.66b	6.10±0.70a	5.81±0.71a	6.41±0.86a
狗牙根	7.78±1.32a	7.54±1.54a	7.26±1.04a	7.32±1.07a	6.63±0.84a	6.77±0.95a	5.70±1.12a	6.63±1.34a
空心莲子草	6.04±0.96b	6.20±1.26b	5.89±0.84b	6.06±1.02b	6.88±0.79a	6.11±0.75a	5.59±0.93a	5.40±0.86b

注:不同字母表示同一区域不同处理差异显著($p<0.05$)。

2.3 植被—水位对土壤磷释放影响

2.3.1 植被—水位对总磷释放影响 水淹后裸地各区域 TP 含量均有上升,土壤吸收磷能力增强(图 4),根据相关研究^[21],水淹使土壤氧化铁活化度增加,影响土壤溶液中磷酸根离子的类型,进而影响磷酸根离子与氧化铁表面配合的形式,使得土壤对磷的吸附强度增大。在第 36 天,狗牙根与其他 2 种处理 A 区域 TP 含量变化差异显著,裸地与空心莲子草差异不显著。水淹初期(0~8 天),水位上升至 A 区域,由于狗

牙根生长,各区域土壤 TP 迅速减少,而 A 区域狗牙根生长受到水淹抑制,土壤 TP 转化率降低,故 A 区域下降最少(8.3%)。水淹第 20~28 天,水位下降,植物和微生物生长加速了土壤 TP 消耗,狗牙根各区域 TP 含量出现第 2 次较大降低,分别下降 15.60%,10.46%,15.01%,12.39%。在水淹初期(0~8 天),空心莲子草 A、B 区域 TP 含量明显下降(20.07%,23.42%),此时植株为获取外界的氧分,加快了茎的伸长生长和不定根的形成,这些过程消耗了大量土壤养分^[6]。

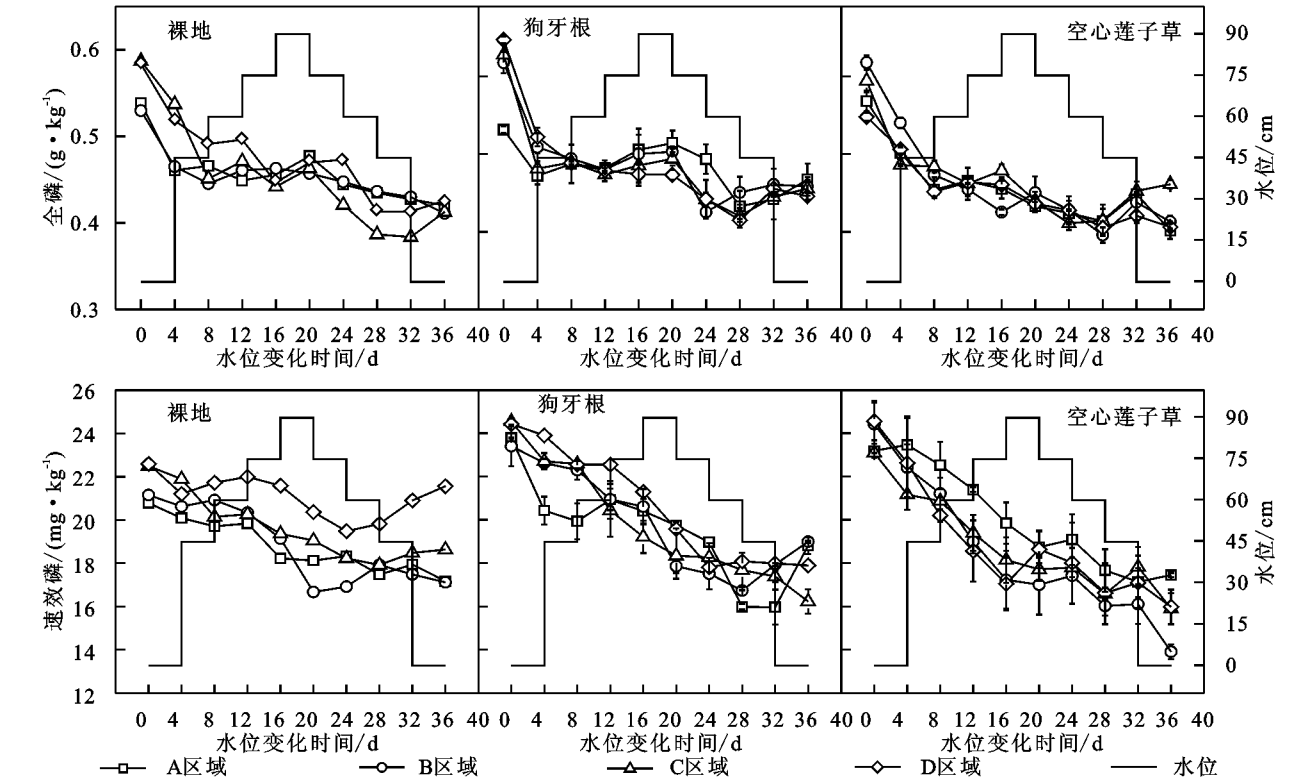


图 4 水淹—落干周期各区域土壤磷含量变化

2.3.2 植被—水位对速效磷释放影响 土壤 AP 是评价土壤中磷素活性的综合性指标,其含量水平不仅对植物生长起关键性作用,而且能较好地表征土壤磷素向水体释放的风险^[22]。通过对 3 种处理进行同区域比较,发现 3 种处理间 AP 含量变化差异不显著。由图 4 可知,各处理土壤 AP 都随水位变化缓慢降低,但植被土壤 AP 释放速率更快。第 0~16 天,裸地各区域 AP 含量下降率差异极显著,依次为 $A < B < C < D$,水淹时间越长,土壤释放的磷越多。第 24~36 天,水位落干,土壤风干过程中会导致部分微生物死亡,释放微生物磷,裸地 C、D 区域 AP 含量都有上升(2.21%,10.69%)。由于狗牙根 A、B 区域植被出现大量死亡,植株体腐解导致部分 AP 释放至土壤,而狗牙根 C、D 区域无大量死亡,且植株生长加速土壤 AP 消耗,故狗牙根 A、B 区域 AP 下降率较裸地低,而 AP 含量较裸地下降率高。由图 2 可知,空心莲子草各区域持续消耗 AP 保持生长,其中 B 区域生长最旺盛,试验结束时植被干重最大,故空心莲子草各区域土壤 AP 含量逐渐降低,且 B 区域 AP 的释放量和释放速率明显高于其他区域。

3 结论

(1)植被—水文条件主要影响土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 AP 变化,对土壤 TN、TP 含量影响较小,干湿交替环境影响土壤 N、P 形态间转换,这一点尤其表现在土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 AP 上。

(2)2 种植被 12 天后可有效减少土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 进入水体;16 天后可有效减少土壤 TN 进入水体。

(3)狗牙根死亡增加土壤 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 量,即不耐淹植被过滤带虽然能净化径流中 N、P 等污染物,但截留的污染物和植物吸收的养分随植物体分解再次进入水体或土壤,无法达到有效防控农业面源污染目的。

本研究为利用丹江口库区优势物种狗牙根和空心莲子草作为植被缓冲带缓控农业面源污染提供理论依据,具有一定实际意义。

参考文献:

[1] 程瑞梅,刘泽彬,肖文发,等.三峡库区典型消落带土壤化学性质变化[J].林业科学,2017,53(2):19-25.
[2] 林俊杰,刘丹,张帅,等.淹水—落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响[J].环境科学,2017,38(2):555-562.
[3] 肖丽微,朱波.水环境条件对三峡库区消落带狗牙根氮磷养分淹水浸泡释放的影响[J].环境科学,2017,38(11):4580-4588.

[4] 刘娜.三峡库区消落带典型植物淹水后降解动态与养分释放特征研究[D].重庆:西南大学,2016.
[5] You Y. Effect of water level regulation on vegetation characteristics in the water - level- fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(6): 1103-1109.
[6] 姚程,胡小贞,卢少勇,等.几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用[J].环境科学,2017,38(2):589-599.
[7] Heathwaite A L, Griffiths P, Parkinson R. Nitrogen and phosphorus in runoff from grassland with buffer strips following application of fertilizers and manures [J]. Soil Use and Management, 2006, 14(3): 142-148.
[8] 杨文航,任庆水,秦红,等.三峡库区消落带不同海拔狗牙根草地土壤微生物生物量碳氮磷含量特征[J].草业学报,2018,27(2):57-68.
[9] 邝臣坤,郑美燕,李建生.香根草及狗牙根对水库消落带淹水环境的适应性模拟研究[J].环境保护与循环经济,2018,38(4):41-45.
[10] 张乖乖,简敏菲,余厚平,等.水淹胁迫下空心莲子草的光合和荧光特征及其生理和生态响应[J].湿地科学,2018,16(1):73-78.
[11] Piotr B. Transport of contaminants in agricultural catchments during snowmelt: Buffer strips vs. preferential flow paths [J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 2013, 13(1): 31-40.
[12] 汤家喜,孙丽娜,孙铁珩,等.河岸缓冲带对氮磷的截留转化及其生态恢复研究进展[J].生态环境,2012,11(8):1514-1520.
[13] Hille S, Andersen D K, Kronvang B, et al. Structural and functional characteristics of buffer strip vegetation in an agricultural landscape-high potential for nutrient removal but low potential for plant biodiversity [J]. Science of the Total Environment, 2018, 628(3): 805-814.
[14] 郭佳,蒋先,周雪,等.三峡库区消落带周期性淹水—落干对硝化微生物生态过程的影响[J].微生物学报,2015,56(6):983-999.
[15] Shang F Z, Yang P L, Li Y K, et al. Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 103-110.
[16] 王建超,朱波,汪涛,等.三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验[J].环境科学,2012,33(4):1144-1151.
[17] Zhou Y, Xu J F, Yin W, et al. Hydrological and environmental controls of the stream nitrate concentration and flux in a small agricultural watershed [J]. Journal of Hydrology, 2017, 545(1): 355-366.
[18] 周涛,李正魁,冯露露.氨氮和硝氮在太湖水华自维持中的不同作用[J].中国环境科学,2013,33(2):305-311.

不同时期土壤含水率空间相关度在 0.038%~20.408%,土壤盐分空间相关度在 0.043%~8.374%,均小于 25%,说明具有强烈的空间相关性,可以认为主要是受结构性因素的影响,随机因素占总变异很小,自相关引起的空间变异性较强。通过 Kriging 空间插值分析,可以看出试验区北侧盐分要远大于南侧,试验区北侧荒地不受人类农业生产活动的干扰又由于蒸发强烈而导致盐分表聚,耕地每年有灌溉淋洗,且试验区南高北低,是这种盐分分布格局形成的重要因素,这也是导致荒地土壤次生盐渍化的主要原因。

(3)在研究区内,荒地地下水埋深与土壤盐分均满足线性关系,耕地地下水埋深与土壤盐分均满足指数关系, $R^2 > 0.79$ 相关性均较好,土壤盐分随着地下水埋深减小而增大,荒地 0—20 cm 土壤盐分含量随地下水埋深变化趋势较大,20—40,40—100 cm 土壤盐分含量随地下水埋深变化趋势较小,耕地地下水埋深在 1~1.6 m 时,土壤盐分含量随着地下水埋深变化趋势较大,当地下水埋深大于 1.6 m 时,土壤盐分含量随着地下水埋深变化趋势较小。利用健全的灌排系统能有效地控制地下水位,防治因返盐而造成土壤盐渍化,是防治盐碱地的重要手段。

参考文献:

- [1] 曹明. 基于 ArcGIS 的河套灌区水土资源数据库的开发与应用[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [2] 管孝艳,王少丽,高占义,等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报,2012,32(4):1202-1210.
- [3] 寇薇. 内蒙古河套灌区土壤水盐空间变异性研究[D]. 兰州:西北师范大学,2008.
- [4] 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等. 基于多源数据的中原黄泛区土壤盐分空间变异分析[J]. 农业工程学报,2015,31(5):115-120.
- [5] 朱金余,郭世文,杨永利,等. 天津滨海开发区绿地土壤

盐分时空变异特征[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):161-168.

- [6] 刘迁迁,苏里坦,刘广明,等. 伊犁察南灌区土壤盐分时空变异特征与运移机理研究[J]. 农业机械学报,2017,48(12):221-228.
- [7] 李彬,史海滨,妥德宝,等. 节水改造前后土壤盐剖面特征及其空间分布:以内蒙古河套灌区中游临河区为例[J]. 干旱区研究,2015,32(4):663-673.
- [8] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [9] 陈丽娟,冯起,成爱芳. 民勤绿洲土壤水盐空间分布特征及盐渍化成因分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(11):99-105.
- [10] 阮本清,许凤冉,蒋任飞. 基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析[J]. 水利学报,2008,39(5):573-579.
- [11] 马玉蕾,王德,刘俊民,等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2423-2430.
- [12] 李亮,李美艳,张军军,等. 基于 HYDRUS-2D 模型模拟耕荒地水盐运移规律[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(1):66-71.
- [13] 邹晓霞,王维华,王建林,等. 垦殖与自然条件下黄河三角洲土壤盐分的时空演化特征研究[J]. 水土保持学报,2017,31(2):309-316.
- [14] 张冈,周志宇,张彩萍. 利用方式对盐渍化土壤有机质和盐分的影响[J]. 草业学报,2007,16(4):15-20.
- [15] 柯隽迪,黄权中,任东阳,等. 河套灌区节水灌溉对土壤盐分累积规律的模拟研究[J]. 节水灌溉,2016(8):91-94.
- [16] 姚荣江,杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析[J]. 农业工程学报,2007,23(8):45-51.
- [17] 于淑会,刘金铜,李志祥,等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. 中国生态农业学报,2012,20(12):1664-1672.

(上接第 245 页)

- [19] Panda D, Sharma S G, Sarkar R K. Chlorophyll fluorescence parameters, CO_2 photosynthetic rate and regeneration capacity as a result of complete submergence and subsequent re-emergence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Aquatic Botany, 2008, 88(2): 127-133.
- [20] 韩文娇,白林利,李昌晓. 水淹胁迫对狗牙根光合、生长及营养元素含量的影响[J]. 草业学报,2016,25(5):49-59.
- [21] Huang H B, Ouyang W, Wu H T, et al. Long-term diffuse phosphorus pollution dynamics under the combined influence of land use and soil property variations [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579(1): 1894-1903.
- [22] 石艳,杨茜,江韬,等. 三峡水库消落带典型土壤中磷的形态转化特征[J]. 水土保持学报,2014,28(6):325-331.