

筑坝蓄水对高原湿地拉市海土壤有机质和全氮分布格局的影响^{*}

杨洪昇¹ 田 昆^{2**} 姚 茜¹ 曹萍麟¹

(¹西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224; ²国家高原湿地研究中心, 昆明 650224)

摘 要 筑坝扩容导致湿地面积增加。基于筑坝前后变化, 沿淹水梯度采集土壤, 了解高原湿地拉市海有机质和全氮分布的现状, 比较筑坝蓄水前后有机质和全氮的差异性。结果表明: 筑坝蓄水后淹水区土壤有机质和全氮均比未淹水土壤有所增加, 同时随着淹水强度的加强, 有机质和全氮含量都表现为先增加后减少的趋势; 就同一淹水梯度而言, 受人为干扰较严重的土壤(弃耕地土壤)有机质和全氮含量显著低于干扰较小的土壤(草甸土壤)。方差分析表明, 有机质和全氮含量在干湿交替的季节性淹水区差异不显著($P>0.05$), 在常年淹水区则差异显著($P<0.05$)。相关性分析表明, 研究区域内淹水强度与土壤有机质和全氮呈显著正相关, 有机质与全氮呈显著正相关, 全氮、有机质与碳氮比也呈显著正相关($P<0.01$)。研究结果为科学评估筑坝蓄水对湿地生态系统的影响, 为高原湿地生态系统的保护管理提供了科学依据。

关键词 筑坝扩容; 土壤有机质; 土壤全氮; 分布格局

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)1-0162-06

The impacts of dam impoundment on the distribution patterns of soil organic matter and total nitrogen in Lashihai plateau wetland. YANG Hong-sheng¹, TIAN Kun^{2**}, YAO Xi¹, CAO Pin-lin¹ (¹*College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*; ²*National Plateau Wetlands Research Center, Kunming 650224, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(1): 162–167.

Abstract: Dam enlargement can lead to the increasing distribution area of flooded wetlands. In the present study, soil samples along a flooding gradient in Lashihai Plateau wetland were collected and analyzed in order to understand the distribution patterns of soil organic matter and total nitrogen, and the differences in their contents before and after the dam impoundment were compared. The results showed that compared to the unflooded area, the contents of soil organic matter and total nitrogen in the flooded area were higher. Also, as the flood intensity increased, the contents of organic matter and total nitrogen first increased and then decreased. As far as the same flood intensity was concerned, the soils severely affected by human activities (*e.g.*, abandoned cropland soils) had lower levels of organic matter and total nitrogen than the undisturbed soils (*e.g.*, meadow soil). The analysis of variance (ANOVA) showed that the contents of organic matter and total nitrogen were significantly changed in the perennial waterlogging area ($P<0.05$) but not in the seasonal flooding area with the alternation of wet and dry seasons ($P>0.05$). Correlation analysis showed that flood intensity was positively correlated with soil organic matter and total nitrogen contents ($P<0.01$). Also, soil organic matter was positively correlated with total N ($P<0.01$). The results could provide basic data to evaluate the impacts of dam impoundment on wetland ecosystems and also a theoretical basis for protection and management of plateau wetland ecosystems.

Key words: dam enlargement; soil organic matter; soil total nitrogen; distribution pattern.

^{*} 国家重点基础研究发展计划前期研究专项(2012CB426509)、国家自然科学基金项目(40971285、31370497T和41001332)、云南省科技计划项目(2008CA006和2010CA010)和云南省科技创新人才计划项目(2012HC007)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: tlkunj@126.com

收稿日期: 2014-07-01 接受日期: 2014-09-11

筑坝扩容蓄水是湿地水资源的重要利用方式,中国许多地方甚至把筑坝作为退化湿地恢复的主要工程措施(袁峰晓等,2009;摆万奇等,2010),湿地筑坝扩容能够迅速增加湿地的面积和湿地的水位,但湿地筑坝对生态系统的影响具有众多争议。筑坝淹水直接导致湿地水文改变、形成新的淹水区,引起湿地生态系统组成结构的变化,由此,可能带来湿地功能的改变,影响鱼类的繁殖、鸟类多样性的改变以及土壤性质的变化等。湿地植被的形成是湿地生态结构与功能演化过程的关键,而土壤有机质(SOM)为植被的形成和生存提供了能源和基质,在维持生物多样性方面起着至关重要的作用(Franzluebbers, 2002; Bilen *et al.*, 2010)。氮素则是湿地生态系统中最主要的限制因素之一(郭劲松等,2012),也是导致水体发生富营养化的主要因子之一(白军红等, 2001)。同时,有机质和全氮(TN)作为湿地土壤的重要组成部分和湿地生态系统中的重要生态因子,其含量直接影响着湿地生态系统的生产力(Mitsch *et al.*, 1986)。因此,研究筑坝扩容下湿地土壤碳氮分布格局,可为湿地的科学管理、维持区域生物多样性以及湿地生态系统的可持续发展,以及科学评估筑坝对湿地生态系统的影响提供科学依据。

湿地生态系统营元素物质循环与湿地生态系统健康发展密切相关(Lodhiyal *et al.*, 2003; 刘吉平等, 2006),随着气候变化和环境变化的加剧,湿地生态系统营元素物质循环研究已成为湿地生态研究的热点(何池全等, 2001; Stribling *et al.*, 2001; 熊汉锋等, 2005),湿地土壤中的碳和氮是气候环境变化的敏感指标(李俊清等, 2000),因此,碳、氮的研究倍受重视(齐雁冰等, 2008; 史惠兰等, 2011)。然而,目前为应对气候变化,尤其是干旱导致的湿地退化萎缩进行筑坝蓄水,所带来的湿地土壤碳氮变化缺乏研究,有关高原湿地拉市海的研究主要集中在湿地的开发利用(赵玉堂, 2003; 李艳娟, 2010; 马立广等, 2011)、湿地资源动态变化(李纯等, 2000; 肖德荣等, 2012)、生物多样性调查(和淑春等, 2006; 胡圆圆等, 2008)等方面。

本研究通过对拉市海筑坝蓄水6年后土壤有机质和全氮的分布特征、土壤C/N、土壤碳氮相关性的分析,认识和掌握筑坝蓄水对高原湿地土壤碳氮的影响及其变化规律,弄清湿地土壤有机质和全氮对水文改变的响应,以期对湿地的科学管理、维持区域生物多样性以及湿地生态系统的可持续发展提供科

学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

1993年筑坝扩容前拉市海是一个典型的季节性湖泊,旱季排干后仅有流经湖心的河沟有积水;1993年拉市海西南部实施了筑坝蓄水,形成淹水水位相对稳定的半自然湖泊;2005年拉市海在第一次筑坝的坝址上进行了坝体加高加宽,并在2008年开始蓄水,形成了更大的淹水水面。筑坝扩容后长期蓄水所导致的水文条件改变,必将影响到土壤碳氮的分布格局,进而影响湿地生态系统功能。

研究样地位于拉市海西南角($26^{\circ}52'04.9''\text{N}$ — $26^{\circ}51'39.1''\text{N}$, $100^{\circ}07'48.5''\text{E}$ — $100^{\circ}07'51.0''\text{E}$),该区域地势平缓,2006年筑坝蓄水以前为非淹水区,受人为干扰的影响,该区域形成了2种不同的景观类型,分别为弃耕地、草甸。弃耕地植物群落以杂草群落为主,草甸则以狗牙根(*Cynodon dactylon*)群落为主。2008年筑坝蓄水以来,形成了不同的淹水梯度,根据淹水时间的不同,可以把该区域分为常年淹水区、季节性淹水区、非淹水区。常年淹水区从2008年蓄水以来一直处于被淹没状态,仅偶尔出露,经过5年的演替,该区域现阶段主要分布的是水生植物群落;季节性淹水区在5月雨季之后逐渐开始淹没并一直持续淹没到次年的1月,之后水位逐渐下降至土壤出露,即该区域在2—5月一般不被水淹没,该区在淹水时期主要以水生和沼生植物为主,在未淹水时期主要以湿生和湿中生植物为主;非淹水区筑坝后不被水淹没,与筑坝前的研究区相似,该区植被主要为早生的草甸植物,筑坝蓄水前后植物无变化。

1.2 研究方法

基于筑坝前后变化,沿淹水梯度设置研究样带,比较拉市海筑坝蓄水前后土壤有机质和全氮的差异性。以未淹水区为对照,在拉市海研究区沿湖心至湖岸方向均匀设置8个采样点,样点间距大约为100 m,在每个水位梯度上分别采集3个弃耕地土样、3个草甸土样,共采集土样48个。同时把最高水位处(湖岸)记为A点,根据淹水深度0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.1和1.3 m的差异依次记为B、C、D、E、F、G、H点,A、B、C、D 4个水位梯度土壤在2008年蓄水以来处于季节性的淹水—落干—淹水过程,即该区域属于季节性淹水区;E、F、G、H 4个水位梯

度土壤长期处于淹没状态,仅偶尔出露,即该区域属于常年淹水区;将未经过淹水土壤作为对照区,同时设置 4 个采样点,分别采集 3 个弃耕地土样和 3 个草甸土样作为对照,共采集土样 24 个。采取土样时,使用洛阳铲采集表层土(0~20 cm),样品采集时同时记录经纬度。采集的土样带回实验室后自然风干,去除石块、残根等杂物,磨碎,过 0.25 mm 的孔筛,装袋备用待测。土壤有机质的测定采用重铬酸钾法,全氮的测定采用开氏消煮法,每个土样重复测定 3 次。

1.3 数据处理

所有数据统计和分析都通过 SPSS 17.0 和 Microsoft Excel 2003 实现。采用单因素方差分析(LSD)检验不同水位梯度土壤有机质的差异性、全氮差异性及碳氮比差异性。采用配对样本 *T* 检验,比较同一水位不同土壤类型间土壤有机质的差异性、全氮差异性及碳氮比差异性。采用相关分析检验有机质、全氮、碳氮比之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 有机质在土壤中的分布特征

筑坝蓄水后拉市海草甸土壤有机质含量 49.26~79.18 g·kg⁻¹,弃耕地土有机质含量 39.42~69.98 g·kg⁻¹,与对照区相比,筑坝蓄水后草甸土和弃耕地土有机质含量显著大于对照,分别增加了 23.12 和 25.30 g·kg⁻¹。对比不同类型土壤有机质含量(图 1)发现,筑坝蓄水后草甸土壤有机质含量显著大于弃耕地土壤有机质含量(*P*<0.05),这与对照区的变化趋势一致。

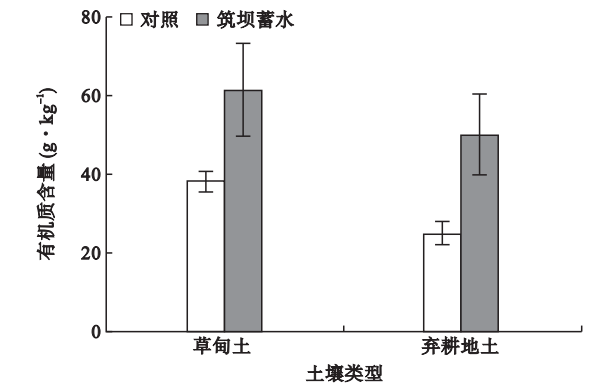


图 1 筑坝蓄水后不同土壤类型有机质含量
Fig.1 Organic matter content of different soil types after damming

对比不同水位梯度土壤有机质含量可知,随着淹水强度的增加草甸土壤和弃耕地土壤有机质含量均呈现先增加后减小的趋势,均在 F 水位上达最大值,分别为 78.36±0.60 g·kg⁻¹(平均值±标准差,下同)、68.98±0.81 g·kg⁻¹(图 2)。可见,土壤有机质含量与淹水强度有着密切的关系。方差分析表明,草甸土壤有机质含量在水位梯度 A、B、C、D 上均无显著差异(*P*>0.05),在水位梯度 E、F、G、H 上则差异性显著(*P*<0.001),弃耕地土壤具有相同变化趋势,即季节性淹水区土壤有机质含量差异不显著,常年淹水区土壤有机质含量则差异显著。

2.2 全氮在土壤中的分布特征

筑坝蓄水后拉市海草甸土壤全氮含量 1.39~1.81 g·kg⁻¹,弃耕地土全氮含量 1.29~1.70 g·kg⁻¹,与对照相比,筑坝蓄水后草甸土和弃耕地土全氮含量分别增加了 0.29 和 0.51 g·kg⁻¹,对比不同类型土壤全氮含量发现,筑坝蓄水后草甸土壤全氮含量显著大于弃耕地(*P*<0.05),与对照区变化趋势一致(图 3)。

对比不同水位梯度土壤全氮含量可知,随着淹水强度的增大,草甸土壤和弃耕地土壤全氮含量都呈现先增加后减小的趋势,均在 F 水位达到最大值,且同一水位梯度上,弃耕地土壤全氮含量显著低于草甸土壤全氮含量(图 4),呈现出与有机质一致的变化趋势。方差分析表明,草甸土壤和弃耕地土壤的全氮含量在水位梯度 A、B、C、D 上均无显著性差异(*P*>0.05);草甸土壤全氮含量在水位梯度 F、G、H 上差异不显著(*P*>0.05),但与 E 水位则存在极显著性差异(*P*<0.001),而弃耕地土壤全氮含量在水位梯度 E、F、G、H 则差异性显著(*P*<0.05)。

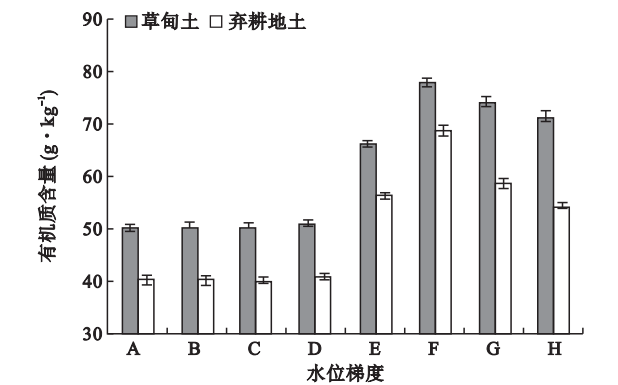


图 2 不同水位梯度下土壤有机质含量变化
Fig.2 Changes of organic matter content at different water levels

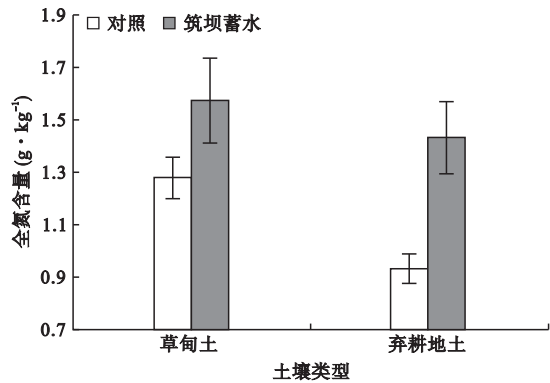


图3 不同土壤类型的全氮含量变化
Fig.3 Changes of soil total nitrogen content in different soil types

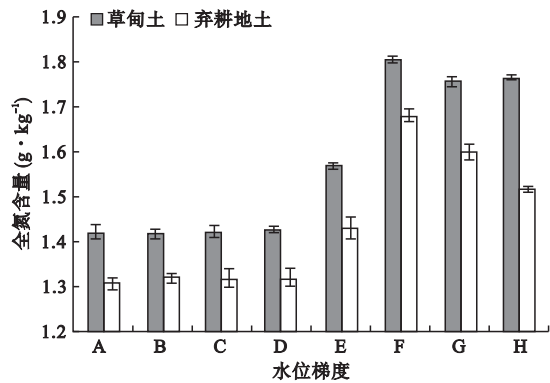


图4 不同水位梯度下土壤全氮含量变化
Fig.4 Changes of soil total nitrogen content at different water levels

2.3 土壤碳氮比

拉市海未淹水区(对照区)草甸土壤和弃耕地土壤有机碳和全氮的比值较低,分别为 17.09~18.24、13.17~17.60,筑坝淹水区草甸土壤和弃耕地土壤碳氮比的含量较高,分别为 20.32~25.34、17.41~24.02(图5)。

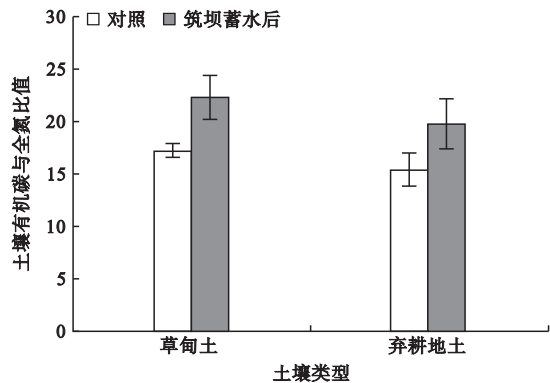


图5 不同土壤类型碳氮比
Fig.5 C/N ratio in different soil types

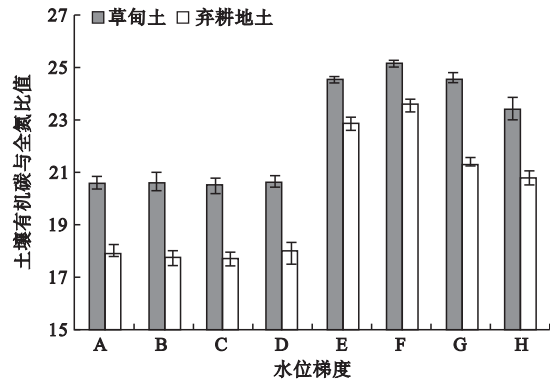


图6 不同水位梯度下土壤碳氮比变化
Fig.6 Changes of soil C/N ratio at different water levels

对比不同水位梯度土壤碳氮比可知,随着淹水强度的增大,草甸土壤和弃耕地土壤碳氮比均呈现先增加后减小的变化趋势,且同一水位梯度上,弃耕地土壤有机质含量显著低于草甸土壤全氮含量(图6)。方差分析表明,草甸土壤碳氮比在水位梯度 E、F、G 上无显著性差异($P>0.05$),但与 H 水位则具有显著性差异($P<0.05$);弃耕地土碳氮比在水位梯度 E、F、G、H 上无显著性差异($P>0.05$),但 E 与 F、G 与 H 之间却存在显著性差异($P>0.05$);在水位梯度 A、B、C、D 上草甸土壤及弃耕地土壤碳氮比均无显著性差异($P>0.05$)。

2.4 淹水强度与土壤 OM、TN、C/N 之间的相互关系

从土壤淹水强度及 OM、TN、C/N 之间的相关性可以看出(表1,表2),草甸土和弃耕地土淹水强度

表1 草甸土壤淹水强度及 OM、TN、C/N 之间的相关系数矩阵
Table 1 Matrix of correlation coefficients between OM, TN, C/N ratio and flooding intensity in meadow soil

相关因子	OM	TN	C/N
TN	0.976 **		
C/N	0.971 **	0.902 **	
水位梯度	0.917 **	0.919 **	0.861 **

** $P<0.01$, 样本数 $n=36$ 。

表2 弃耕地土壤淹水强度及 OM、TN、C/N 之间的相关系数矩阵
Table 2 Matrix of correlation coefficients between OM, TN, C-N ratio and flooding intensity in abandon farmland meadow soil

相关因子	OM	TN	C/N
TN	0.969 **		
C/N	0.957 **	0.868 **	
水位梯度	0.856 **	0.831 **	0.803 **

** $P<0.01$; 样本数 $n=36$ 。

与 OM、TN、C/N 呈极显著正相关。草甸土和弃耕地土 OM 和 TN 之间也呈极显著正相关,相关系数分别为 $R=0.976$ 、 $R=0.969$,表明 OM 和 TN 具有相同的变化趋势。C/N 与 OM 和 TN 之间也呈极显著正相关,可见土壤 OM 和 TN 虽然具有相同的变化趋势,但 OM 的增加速率显著大于全氮的增加速率,故 C/N 与 TN 也呈正相关。

3 讨论

本研究发现,筑坝蓄水后淹水区土壤有机质和全氮都比未淹水土壤有所增加,可见淹水环境下,土壤处于还原条件,有利于有机质形成,而矿化较低,有机质和氮处于积累状态,这与田昆等(2004)的研究结果一致。同时随着淹水强度的增大,土壤有机质和全氮均表现为先增加后减少的变化趋势,即一定强度的淹水有利于有机质和全氮的积累,这与常超等(2011)淹水后消落带土壤有机质和全氮含量显著小于未淹水土壤的研究结果相悖,出现这种差异的原因可能是消落带水位变化剧烈,缺少植被导致土壤无枯落物返还及有机养分积累。另外,随着淹水强度的增强,土壤有机质和全氮在季节性淹水区(A、B、C、D 4 个水位梯度)虽然表现为逐渐增加的趋势,然而方差分析表明差异不显著,而在常年淹水区(E、F、G、H 4 个水位梯度)有机质存在显著性差异,全氮除草甸土壤 F、G、H 3 个水位梯度差异不显著外,都具有显著性差异,可见反复的淹水-落干-淹水过程减少了土壤有机质和全氮的差异性,郭劲松等(2012)的研究也表明,消落带的干湿交替减少了土壤有机质和全氮的变异系数。此外,虽然筑坝前后草甸土壤有机质和全氮含量都显著大于弃耕地土壤,但与各自的对照区相比,弃耕地土壤有机质和全氮含量增加的量比草甸土壤增加的量分别多了 2.19 和 0.22 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见筑坝蓄水作为退化湿地土壤恢复的措施之一具有一定意义,也表明了人为干扰显著改变湿地土壤有机质和全氮的特征。是否采取筑坝蓄水以恢复退化湿地土壤应从生态系统尺度审慎考虑。

研究区域内土壤淹水强度与有机质和全氮均呈显著正相关($P<0.01$),表明淹水强度是有机质和全氮的主要限制因子。土壤有机质与全氮呈显著正相关($P<0.01$),表明有机质和全氮具有相同的变化趋势,同时也表明土壤氮素主要以有机氮的形式存在于有机质中,这与白军红等(2002)、郭劲松等

(2012)、石福臣等(2007)、徐玲等(2009)的研究结果一致。全氮和有机质与碳氮比显著正相关,表明有机质和全氮虽然具有相同的变化趋势,但有机质增加的速率要大于全氮,王爱军等(2007)研究也表明,有机碳、全氮都与碳氮比呈显著正相关,这与一些学者研究结果相悖,毛志刚等(2009)的研究表明,有机碳与碳氮比显著正相关,而全氮与碳氮比的相关性很弱,郭劲松等(2012)在三峡库区消落带的研究则表明,碳氮比与有机质之间的相关性不显著,而与全氮呈极显著负相关。可见,不同的区域土壤碳氮比对有机质和全氮含量的敏感性存在差异。

本研究表明,随着淹水时间的延长,土壤有机质和全氮都表现为逐渐增加的趋势,即随着筑坝年限的增加,新增湿地土壤碳“汇”和氮“汇”的功能越来越明显,但本研究所采土样淹水深度都不超过 2 m,随着筑坝蓄水年限的增加,水位的持续上升,这些区域的水位必将上升。有研究表明,拉市海筑坝扩容后一些区域水位大幅度的升高,可能会导致这些区域高等水生植物无法生长和存活(Schmieder *et al.*, 2006),而有机质和全氮大部分来源于植物残体的归还,即较深和较长时间的淹水可能会导致动植物资源的减少,不利于生物多样性的保护,同时减少土壤养分的来源。因此,拉市海筑坝蓄水后,水文的管理对湿地生态系统有着极其重要的意义。为了科学地控制湿地水位,需要深入对湿地水文的驱动规律进行研究,同时加强湿地水位波动的定位跟踪监测,在湿地土壤发挥碳氮“汇”的功能与湿地物质生长功能“源”之间寻找平衡点,以期达到湿地的优化管理以及寻求湿地可持续发展的科学对策。

致谢 李伟老师帮助修改英文摘要,特此致谢。

参考文献

- 白军红, 邓伟, 张玉霞, 等. 2002. 洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征. 环境科学, **23**(2): 77-81.
- 白军红, 邓伟. 2001. 莫莫格湿地土壤氮磷空间分布规律研究. 水土保持学报, **15**(4): 79-81.
- 摆万奇, 土艳丽, 李建川, 等. 2010. 筑坝在湿地恢复中的作用——以拉萨市拉鲁湿地为例. 资源科学, **32**(9): 1666-1671.
- 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 2011. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响. 自然资源学报, **26**(7): 1236-1244.
- 郭劲松, 黄轩民, 张彬, 等. 2012. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征. 湖泊科学, **24**(2): 213-219.

- 何池全, 赵魁义. 2001. 毛果苔草湿地营养元素的积累, 分配及其生物循环特征. 生态学报, **21**(12): 2074-2080.
- 和淑春, 谢志荣, 赵志平. 2006. 拉市海湿地保护区鸟类多样性及其保护管理对策. 林业调查规划, **31**(A01): 82-86.
- 胡圆圆, 林 萍, 肖德荣, 等. 2008. 丽江拉市海高原湿地水生植被调查与分析. 山东林业科技, **38**(1): 1-4.
- 李 纯, 杨晓君. 2000. 云南拉市海高原湿地冬季水禽聚集情况变化. 国土与自然资源研究, (3): 58-61.
- 李俊清, 崔国发. 2000. 西北地区天然林保护与退化生态系统恢复理论思考. 北京林业大学学报, **22**(4): 1-7.
- 李艳娟. 2010. 拉市海湿地观光农业开发利用研究. 农村经济与科技, (6): 134-135.
- 刘吉平, 吕宪国, 杨 青, 等. 2006. 三江平原环型湿地土壤养分的空间分布规律. 土壤学报, **43**(2): 247-255.
- 马立广, 曹彦荣, 李新通. 2011. 基于层次分析法的拉市海高原湿地生态系统健康评估. 地球信息科学学报, **13**(2): 234-239.
- 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 2009. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响. 应用生态学报, **20**(2): 293-297.
- 齐雁冰, 黄 标, 顾志权, 等. 2008. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义. 矿物岩石地球化学通报, **27**(1): 50-56.
- 石福臣, 李瑞利, 王绍强, 等. 2007. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征. 应用生态学报, **18**(7): 1425-1431.
- 史惠兰, 王启基, 景增春, 等. 2011. 高寒地区土地利用方式对土壤碳氮含量的影响. 中国农学通报, **27**(20): 230-234.
- 田 昆, 常凤来, 陆 梅, 等. 2004. 人为活动对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响. 土壤学报, **41**(5): 681-686.
- 王爱军, 陈 坚, 李东义, 等. 2007. 泉州湾海岸湿地沉积物 C、N 的空间变化. 环境科学, **28**(10): 2361-2368.
- 肖德荣, 袁 华, 田 昆, 等. 2012. 筑坝扩容下高原湿地拉市海植物群落分布格局及其变化. 生态学报, **32**(3): 815-822.
- 熊汉锋, 王运华. 2005. 湿地碳氮磷的生物地球化学循环研究进展. 土壤通报, **36**(2): 240-243.
- 徐 玲, 陈益平, 刘石泉, 等. 2009. 南洞庭湖区湿地土壤有机质及氮素空间分布特征. 湖南农业大学学报: 自然科学版, **35**(10): 48-50.
- 袁峰晓, 李俊臻. 2009. 充分认识林业在应对气候变化中的特殊作用——努力搞好沼海湿地和生物多样性保护工作//袁峰晓. 全国湿地规划生态保护及合理开发利用研讨会论文集: 219-221.
- 赵玉堂. 2003. 拉市海高原湿地生态系统及其保护措施. 林业调查规划, **28**(2): 65-69.
- Bilen S, Çelik A, Altıkat S. 2010. Effects of strip and full-width tillage on soil carbon. IV. Oxide-carbon (CO_2 -C) fluxes and on bacterial and fungal populations in sunflower. *African Journal of Biotechnology*, **9**: 6312-6319.
- Franzluebbers AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research*, **66**: 95-106.
- Lodhiyal N, Lodhiyal LS. 2003. Aspects of nutrient cycling and nutrient use pattern of Bhabar Shisham forests in central Himalaya, India. *Forest Ecology and Management*, **176**: 237-252.
- Mitsch J, Gosselink G. 1986. Wetlands. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 89-125.
- Schmieder K, Werner S, Bauer HG. 2006. Submersed macrophytes as a food source for wintering waterbirds at Lake Constance. *Aquatic Botany*, **84**: 245-250.
- Stribling JM, Cornwell JC. 2001. Nitrogen, phosphorus, and sulfur dynamics in a low salinity marsh system dominated by *Spartina alterniflora*. *Wetlands*, **21**: 629-638.

作者简介 杨洪昇,男,1989年生,硕士,主要从事高原湿地生态学研究。E-mail: 505577810@qq.com

责任编辑 王 伟