

DOI: 10.5846/stxb201912052644

张勇, 岳海涛, 刘振亚, 李丽萍, 田昆, 郑秋竹, 张昆. 横断山区草本沼泽湿地水体氮含量空间分布特征. 生态学报, 2020, 40(18): 6427-6433.
Zhang Y, Yue H T, Liu Z Y, Li L P, Tian K, Zheng Q Z, Zhang K. Distribution of nitrogen in the water of marshes across the Hengduan Mountain area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6427-6433.

横断山区草本沼泽湿地水体氮含量空间分布特征

张 勇¹, 岳海涛^{1, 2}, 刘振亚^{1, 2}, 李丽萍¹, 田 昆^{1, 2, *}, 郑秋竹¹, 张 昆¹

¹ 西南林业大学国家高原湿地研究中心, 昆明 650224

² 云南滇池湿地生态系统国家定位观测研究站, 昆明 650224

摘要: 草本沼泽是横断山区重要的湿地类型, 为探明横断山区草本沼泽湿地水体中总氮、硝氮和氨氮的空间分布特征及其控制因素, 于 2014—2017 年在横断山区对典型草本沼泽湿地开展水样采集和分析工作, 同时收集降水量、地表大气温度、水温、水深、人口数量、GDP、家畜数量等环境数据。结果表明: (1) 横断山区草本沼泽湿地水体中总氮含量表现出明显的纬向地带性和垂直地带性: 总氮含量随纬度和海拔增加而下降, 水温是控制这种地带性特征的主要因素。同时, 随经度增加, 水体中总氮含量也显著增加, 社会经济发展因素是导致这种分布特征的主要原因; (2) 横断山区沼泽湿地水体中硝氮和氨氮含量在海拔梯度上的变化趋势不明显; (3) 随经度和纬度增加, 沼泽湿地水体中硝氮含量逐渐增加, 导致这种现象的主要原因是水深和水温; (4) 随经度增加, 沼泽湿地水体中氨氮的含量逐渐增加, 但氨氮含量与自然环境因素和社会经济发展因素均无显著相关性。

关键词: 横断山区; 沼泽湿地; 水体氮含量; 空间分布

Distribution of nitrogen in the water of marshes across the Hengduan Mountain area

ZHANG Yong¹, YUE Haitao^{1, 2}, LIU Zhenya^{1, 2}, LI Liping¹, TIAN Kun^{1, 2, *}, ZHENG Qiuzhu¹, ZHANG Kun¹

¹ National Plateau Wetlands Research Center, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

² Yunnan Dianchi Lake Wetland Ecosystem National Observatory Station, Kunming 650224, China

Abstract: Marsh is an important wetland type in Hengduan Mountain area (HMA). To explore the distribution and control factors of total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NN), and ammonias nitrogen (AN) in water of marshes across HMA, water samples were taken and analyzed during 2014—2017. Meanwhile, environmental data, including precipitation, air temperature, water temperature, water depth, population, gross domestic product (GDP), and number of livestock were collected as well. The results showed that: 1) the content of TN in water of marshes followed the law of latitudinal zonality and vertical zonality, i.e., the content of TN decreased with the increase of latitude and altitude across the HMA. Water temperature was a control factor of the distribution of TN along the latitude and altitude. Meanwhile, the content of TN increased with the increase of longitude, which may drive by socio-economic factors. 2) The contents of NN and AN in water of marshes did not change significantly along the altitude in the HMA. 3) The contents of NN in water of marshes increased with the increase of longitude and latitude across the HMA. Water depth and water temperature were drivers of this distribution. 4) The content of AN in water of marshes increased with the increase of longitude across the HMA. However, the distribution of AN could not be well explained by the natural and socio-economic factors.

基金项目: 科技部基础研究项目 (2013FY111800); 云南滇池湿地生态系统国家定位观测研究站项目 (2019-LYPT-DW-157); 西南林业大学研发经费投入补助项目 (2017YB236)

收稿日期: 2019-12-05; **网络出版日期:** 2020-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tlkunj@126.com

Key Words: Hengduan Mountain area; marsh; nitrogen content; spatial distribution

湿地水体中氮的含量(尤其是硝氮和氨氮含量)不仅对湿地水质、湿地植物生长有直接作用,还可指示区域环境的变化趋势^[1]。通常,随着湿地逆向演替过程的推进,湿地土壤中总氮的贮量下降^[2-4]、湿地水体中的硝氮和氨氮含量增加、湿生植物逐渐被中旱生植物替代^[5]。从全球范围来看,自然环境因素变化(如降水、气温等)和社会经济发展(如人口、GDP、农业生产活动等)是导致湿地退化的原因^[6-8]。

中国 40%以上的湿地生态系统位于青藏高原、云贵高原、黄土高原和内蒙古高原,四大高原上约有 60% 的湿地类型为草本沼泽湿地^[9],它们具有很强的蓄水能力和固碳能力^[10-11]。横断山区位于青藏高原东南部、云贵高原北部,其东西跨度和南北跨度均约 1000 km,该区域分布着大量的草本沼泽湿地。有研究表明由于排水疏干、过度放牧等原因^[12-13],横断山区北部的草本沼泽湿地面积逐渐缩减^[14-16]、水位下降、水质发生变化^[17]。此外,由于空间跨度和海拔跨度均很大,横断山区草本沼泽湿地的水质指标有可能受自然地带性的控制。

截至目前,整个横断山区草本沼泽湿地水体氮含量的空间分布特征尚未见报道。为探明横断山区草本沼泽湿地水体中总氮、硝氮和氨氮的空间分布特征及其成因,本研究对横断山区典型草本沼泽湿地进行水样采集以分析湿地水体中氮含量的空间分布特征,并探讨分布特征与自然环境因素和社会经济发展因素的关系。我们假设横断山区草本沼泽湿地水体氮含量的空间分布受自然地带性和人为干扰两重因素控制。

1 材料和方法

1.1 野外调查及统计数据收集

(1) 水样采集及测定

在 2014—2017 年,于每年的 10 月(此时横断山区的降水量减少,可最大限度排除降水导致的差异)在横断山区及其周边地区开展草本沼泽湿地水体样品采集,以确保不同年份采集的水样具有可比性。本研究的水样采集范围南北跨度约 1169 km,东西跨度约 1174 km,海拔 800—4600 m,涉及云南省、四川省、贵州省和青海省,共 17 个县/市(图 1)。参考《中国沼泽志》中的记载,在上述区域选择了 37 块典型草本沼泽湿地采集表层(0—20 cm)的水体样品,根据所调查沼泽的特征,每块沼泽设置 3—5 个取样点,每个取样点重复取 3 个水样,野外共采集了 384 份水样,在采集样品的同时原位测定水深以及表层水体温度。采集的水样放入便携式冰箱低温保存,然后送到实验室用流动分析仪(SEAL Analytical GmbH, AA3, 德国)测定总氮、硝氮和氨氮的含量。

(2) 气象数据和社会经济数据收集

通过国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)收集湿地斑块所在区域 1981—2017 年的年均降水量、年均气温数据。横断山区(尤其是高海拔地区)经济发展相对滞后,沼泽湿地分布区的社会经济发展主要以第一产业为支柱,对沼泽湿地利用强度较大的生产门类为畜

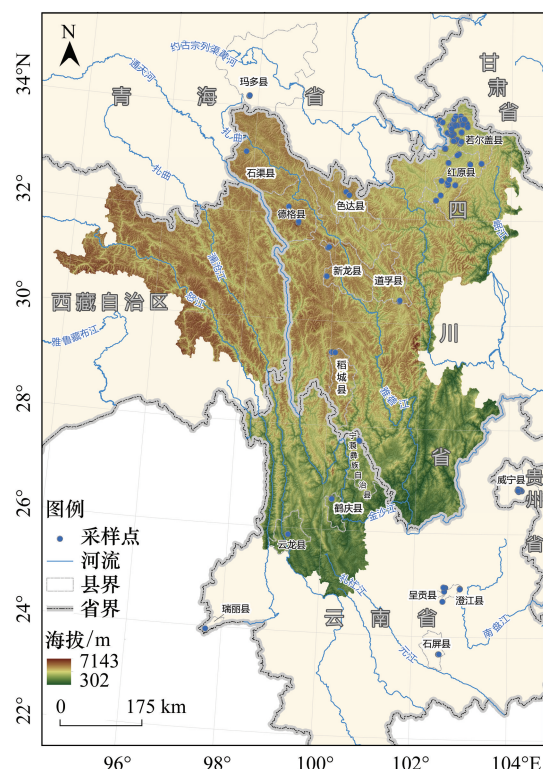


图 1 横断山区及周边典型沼泽湿地采样点分布

Fig. 1 Sampling sites of marshes across the Hengduan Mountain area

牧业,因此,通过各省 2018 年的统计年鉴以及各县/市 2017—2018 年的国民经济和社会发展统计公报等文献搜集调查区域 17 个县/市的人口、GDP、第一产业 GDP、家畜数量(包括存栏量和出栏量)等数据用以分析沼泽湿地水体氮含量与社会经济发展的关系。

1.2 统计分析

用 Origin 9.0 绘制沼泽湿地水体中总氮、硝氮和氨氮在纬度、经度和海拔上的三维分布图。在 SPSS Statistics 17.0.1 中计算自然环境因素(包括年均降水量、地面年均温、水体表层温度和水深)和社会经济发展因素(包括人口、GDP、第一产业产值和家畜数量)与纬度、经度和海拔的 Pearson 相关系数,以探讨这些环境因素的空间分布规律。在 R 软件中采用一元回归模型分别分析沼泽湿地水体中总氮、硝氮和氨氮含量与自然环境因素和社会经济发展因素的回归关系。其中,鉴于数据的可获取性,以县为统计单元分析水体中氮含量(同一个县内的多块湿地数据取均值)与社会经济发展因素的回归关系。

2 结果与分析

2.1 横断山区沼泽湿地水体氮含量及其环境因素的空间分布特征

随纬度增加,横断山区沼泽湿地水体中总氮含量整体呈下降趋势,总氮含量最高的沼泽湿地位于调查区域的南端(约北纬 27.73°,含量为 1.47 mg/L),总氮含量最低的沼泽湿地位于较靠北的区域(约北纬 31.85°,含量为 0.25 mg/L);随经度增加,水体中总氮含量呈自西向东增加的趋势;随海拔高度增加,水体总氮含量呈下降趋势,其中,在海拔 3000 m 左右检测到最高的总氮含量(1.47 mg/L),在海拔 4000 m 左右检测到最低含量(0.25 mg/L)(图 2)。

横断山区沼泽湿地水体中硝氮含量和氨氮含量分别介于 0.059—1.035 mg/L 和 0.032—0.312 mg/L,两者在海拔高度和东—西分布上呈现相似的空间分布特征:硝氮和氨氮含量未随海拔高度发生明显变化;随经度增加,硝氮和氨氮含量逐渐增加。在纬向变化上,硝氮含量随纬度增高而逐渐增加,氨氮含量则无明显变化趋势。硝氮和氨氮含量的空间分布还有一个明显特征:它们在四川省红原县境内的含量最高,该区域海拔介于 3500—4000 m,北纬 32°—34°,东经 102°—104°。进一步统计发现,红原县境内的沼泽湿地水深((0.32 ± 0.02) m)比其他调查区域水深((0.45 ± 0.04) m)低 10 cm 左右。

特别的,本研究中大部分的采样点位于红原县和若尔盖县境内(共 20 块沼泽,占总调查数的 54.1%),在该范围内,沼泽湿地水体中总氮含量在纬向和经向上没有明显的变化趋势,但其随海拔的升高而显著下降($R^2=0.253$, $P=0.024$);硝氮和氨氮含量均未随纬度和海拔发生显著变化,但均随经度的增加而显著升高(硝氮: $R^2=0.240$, $P=0.028$;氨氮: $R^2=0.334$, $P=0.008$)。

横断山区沼泽湿地分布区的自然环境因素(包括年均降水量、年均气温、水温和水深)以及 17 个县/市的社会经济发展指标(包括人口数量、GDP、第一产业产值和家畜数量)与纬度和海拔均呈负相关(表 1)。大部分社会经济发展因素与经度呈弱正相关关系,即:表现出越靠东社会经济发展水平越高的趋势(表 1)。

表 1 自然环境因素($n=37$)和社会经济发展因素($n=17$)与纬度、经度和海拔的关系

	年均降水量 AP	年均气温 AAT	水温 WT	水深 WD	人口数量 PL	GDP	第一产业产值 GDP _{FI}	家畜数量 LN
纬度 Latitude	-0.80**	-0.89**	-0.66**	-0.73**	-0.85**	-0.690*	-0.667*	-0.115
经度 Longitude	0.29	-0.06	0.18	-0.14	0.216	0.143	0.204	-0.001
海拔 Altitude	-0.82**	-0.89**	-0.81**	-0.62**	-0.842**	-0.692*	-0.719*	-0.213

AP:年均降水量 Annual precipitation; AAT:年均气温 Annual air temperature; WT:水温 Water temperature; WD:水深 Water depth; PL:人口数量 Population; GDP:国内生产总值 Gross domestic product; GDP_{FI}:第一产业产值 GDP of the first industry; LN:家畜数量, livestock number; **: $\alpha<0.001$; *: $\alpha<0.01$

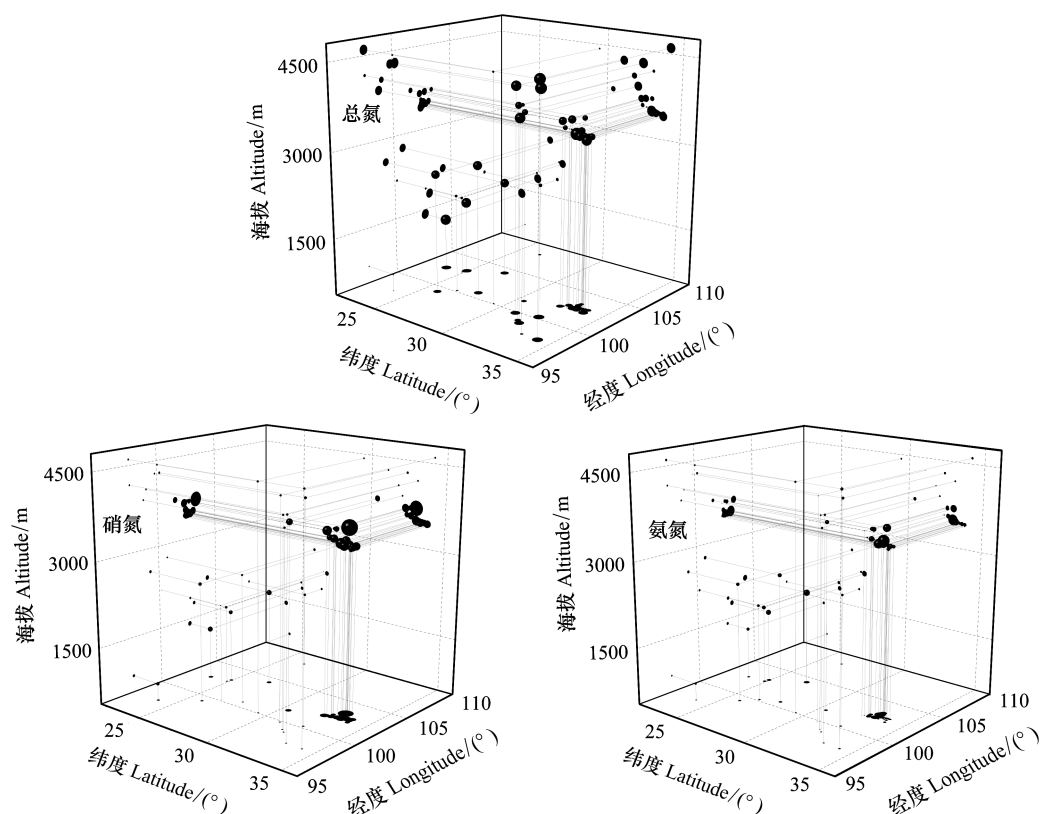


图2 横断山区沼泽湿地水体总氮、硝氮和氨氮的空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in the water of marshes across the Hengduan Mountain area

2.2 横断山区沼泽湿地水体氮含量与自然环境的关系

横断山区沼泽湿地水体中总氮含量与自然环境因素均呈显著的线性回归关系,即总氮含量随年均降水量、年均大气温度、水温和水深的增加而显著升高(图3)。硝氮含量与年均降水量无显著回归关系,其随年均大气温度和水深增加而显著下降,其随水温增加呈显著的单峰变化。氨氮含量与上述自然环境因素均无显著回归关系。以全部384个水样进行统计,硝氮、氨氮与总氮含量均呈显著正相关,相关系数分别为0.46和0.39。

2.3 横断山区沼泽湿地水体氮含量与社会经济发展的关系

横断山区沼泽湿地水体总氮含量与社会经济发展因素均呈显著的正相关关系,即总氮含量随人口数量、GDP、第一产业产值和家畜数量的增加而显著升高(图4)。硝氮和氨氮含量与社会经济发展因素没有显著相关性。

3 讨论

水体中营养元素的来源主要包括三个方面:土壤养分矿化、植物残体分解和外源输入^[18-19]。温度是控制湿地生态系统中土壤养分矿化、植物残体分解等养分循环过程的重要因素,一定范围的温度升高可增加这些养分循环过程的速率^[20-22]。自然状态下,地表温度随纬度和海拔增加而下降,有明显的纬向地带性和垂直地带性。本研究发现,横断山区草本沼泽湿地水体中总氮含量随纬度和海拔的增加而降低,进一步的分析发现总氮含量与温度(尤其是水温)有很强的正相关性。这说明横断山区草本沼泽湿地水体中总氮含量分布具有纬向地带性和垂直地带性特征,温度可能是控制这种分布规律的主要因素。本研究还发现,横断山区草本沼

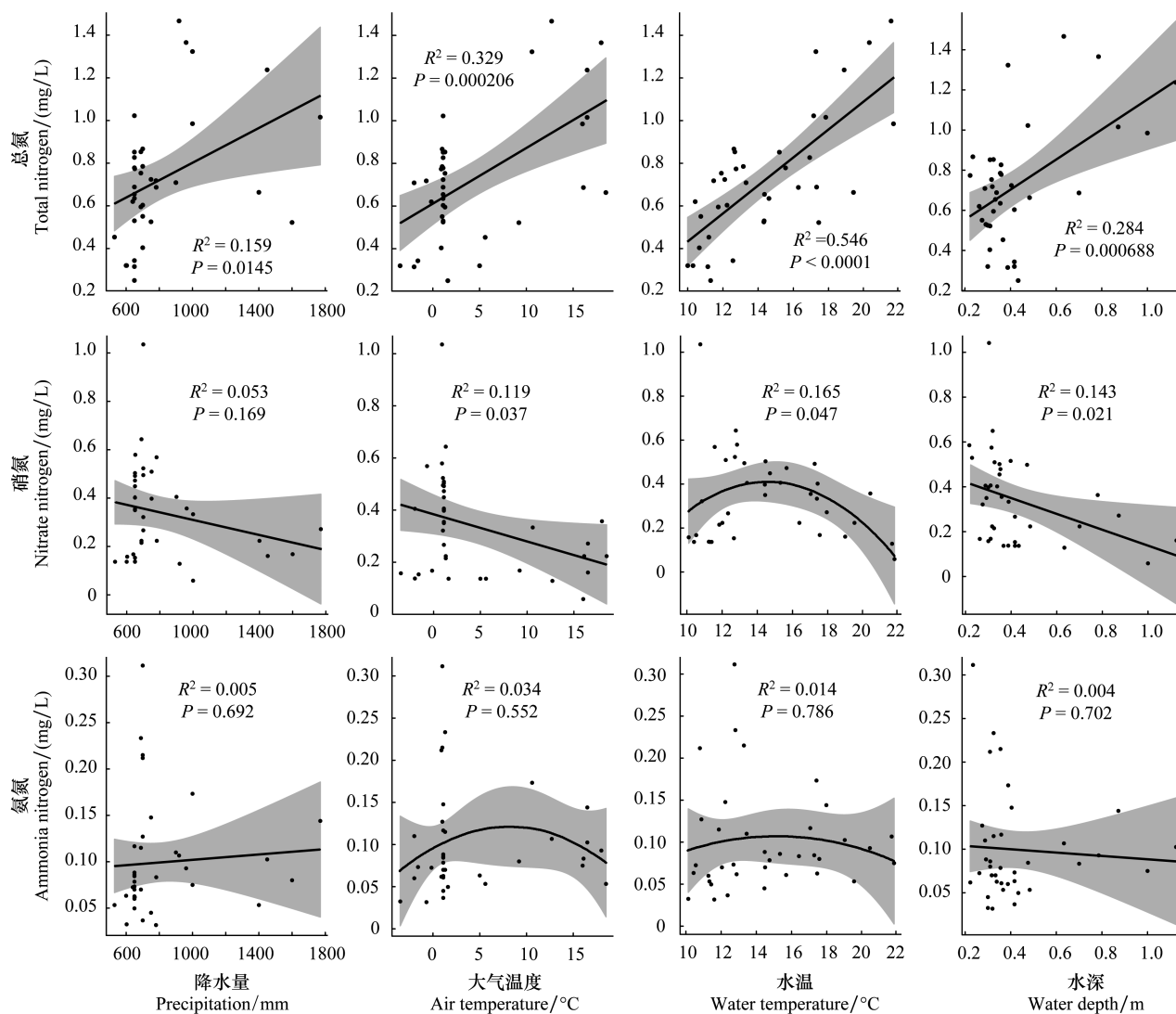


图3 横断山区沼泽湿地水体总氮、硝氮和氨氮含量与降水量、大气温度、水温和水深的关系

Fig.3 Relationship among marshes' total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen and precipitation, air temperature, water temperature and water depth across the Hengduan Mountain area

沼泽湿地水体中总氮含量自西向东呈增加的趋势,这种变化趋势可能与社会经济活动密切相关。因为自西向东,该区域内的人口数量和社会经济发展水平也逐渐增高,回归分析也发现沼泽湿地水体中总氮含量与所有社会经济发展指标(尤其是人口数量)均存在显著的正向回归关系。

本研究发现横断山区草本沼泽湿地中硝氮和氨氮含量的空间分布规律与总氮含量不尽相同。硝氮和氨氮含量的纬向和垂直地带性不明显,它们在若尔盖高原红原县沼泽湿地水体中含量最高。该现象可能由沼泽湿地退化(主要是水位下降)导致。遥感监测发现,自2000年以来四川若尔盖高原草本沼泽面积不断缩减,沼泽逐渐转变为草地^[23-24],造成若尔盖草本沼泽湿地退化的主要原因是人工开渠排水导致的水位下降^[25]。局域尺度的研究表明,如果沼泽淹水条件变差,表层土壤中氧化酶等土壤胞外酶活性会显著增加^[26],这可导致沼泽湿地中的土壤氮矿化速率增加、释放出大量的无机氮^[27-28],从而引起水体中硝氮和氨氮含量升高。本研究发现红原县境内沼泽湿地的淹水条件(水深)较其他区域的沼泽湿地差(水深低约10 cm),这可能为沼泽湿地中泥炭的分解创造了氧化条件、导致水体中硝氮含量与水深呈显著负相关的现象。此外,若尔盖高原上的研究表明,沼泽湿地植物多样性随沼泽水位下降呈增加趋势^[29],植物种间关系发生变化^[30],物种组成变化

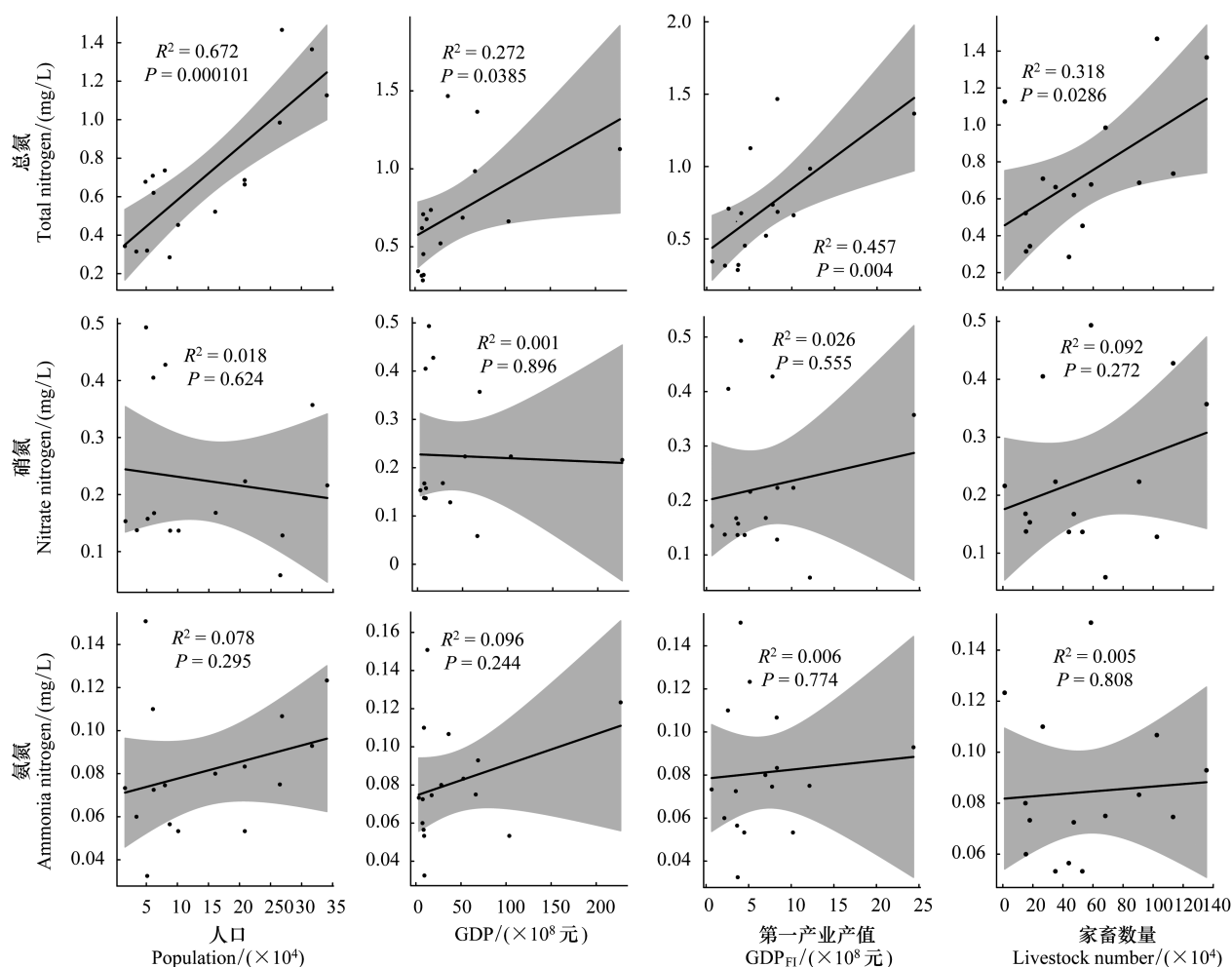


图4 横断山区沼泽湿地水体总氮、硝氮和氨氮含量与人口数量、GDP、第一产业产值和家畜数量的关系

Fig.4 Relationship among marshes' total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen and population, GDP, GDP of the first industry (GDP_{FI}) and the number of livestock across the Hengduan Mountain area

也可能对沼泽湿地水体中硝氮和氨氮的含量造成影响。此外,水温变化对有机氮矿化过程有显著影响^[31],本研究发现横断山区沼泽湿地的水温和硝氮含量呈二次函数关系,根据该关系,当水温介于14—16℃时,硝氮含量最高,当水温高于或低于该范围时,硝氮含量均下降。导致该现象的原因可能是:当温度过低时,横断山区草本沼泽湿地中参与土壤氮矿化的微生物活性受到抑制;随着表层水温升高,表层水体的溶解氧降低,同时,由于表层温度高水体会出现热分层现象,导致底层水体中的溶解氧减少^[32],这些过程使得沼泽湿地土壤中参与反硝化过程的酶活性(如亚硝酸还原酶、硝酸还原酶等)增强^[33],进而导致水体中的硝氮含量降低。

本研究中硝氮和氨氮含量与社会经济发展指标之间没有显著的统计相关性,但横断山区湿地水体的硝氮和氨氮含量、社会经济发展指标(包括人口、GDP、第一产业产值)均自西向东呈增加趋势。已有研究表明人口集中分布区产生的生产、生活污水也可导致湿地水体中硝氮和氨氮含量增加^[34]。因此,社会经济因素对横断山区草本沼泽湿地水体中硝氮和氨氮含量可能还是有一定影响。后续研究需获取更细致的数据分析社会经济因素对横断山区草本沼泽湿地水体硝氮和氨氮含量造成影响的方式和程度。

4 结论

本研究明晰了横断山区草本沼泽湿地水体中氮素(总氮、硝氮和氨氮)在经度、纬度和海拔上的分布特

征,并通过自然环境因子和社会经济发展指标分析了氮素分布特征的控制因素。主要得出以下结论:(1)横断山区草本沼泽湿地水体中总氮含量的分布具有明显的纬度地带性(总氮含量随纬度增加而下降)和垂直地带性(总氮含量随海拔增加而下降),同时受社会经济活动因素的控制(总氮含量与经济活动因素显著正相关)。其中,水温和人口数量是影响总氮含量最主要的自然因素和社会经济因素。(2)横断山区草本沼泽湿地水体中硝氮含量未随海拔发生显著变化,但随着经度和纬度增加,硝氮含量逐渐增加,水温和水深是影响其分布的主要因素。(3)横断山区草本沼泽湿地水体中氨氮含量不随海拔和纬度发生显著变化,但随着经度增加,氨氮含量逐渐增加,但气温、降水、水温、水深、人口数量、GDP、家畜数量等因素与氨氮含量的关系不密切。

参考文献(References):

- [1] 赵魁义,何池全. 人类活动对若尔盖高原沼泽的影响与对策. 地理科学, 2000, 20(5): 444-449.
- [2] 周文昌,崔丽娟,王义飞,李伟. 若尔盖高原退化湿地土壤有机碳储量. 水土保持研究, 2017, 24(5): 27-32.
- [3] 杨永兴. 若尔盖高原生态环境恶化与沼泽退化及其形成机制. 山地学报, 1999, 17(4): 318-323.
- [4] 林春英,李希来,李红梅,孙海松,韩辉邦,王启花,金立群,孙华方. 不同退化高寒沼泽湿地土壤碳氮和贮量分布特征. 草地学报, 2019, 27(4): 805-816.
- [5] 田昆,陆梅,常凤来,莫剑锋,黎良才,杨永兴. 云南纳帕海岩溶湿地生态环境变化及驱动机制. 湖泊科学, 2004, 16(1): 35-42.
- [6] Erwin K L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. Wetlands Ecology and management, 2009, 17(1): 71-84.
- [7] Cui L J, Gao C J, Zhou D M, Mu L. Quantitative analysis of the driving forces causing declines in marsh wetland landscapes in the Honghe region, northeast China, from 1975 to 2006. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(3): 1357-1367.
- [8] Albarakat R, Lakshmi V, Tucker C J. Using satellite remote sensing to study the impact of climate and anthropogenic changes in the Mesopotamian Marshlands, Iraq. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1524.
- [9] 国家林业局. 中国湿地资源(总卷). 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [10] 郑姚闽,牛振国,宫鹏,戴永久,上官微. 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计. 科学通报, 2013, 58(2): 170-180.
- [11] 刘红玉. 中国湿地资源特征、现状与生态安全. 资源科学, 2005, 27(3): 54-60.
- [12] 张骁栋,康晓明,李春义,崔丽娟,王小文. 排水对三江平原和若尔盖沼泽生态影响的比较. 生态学杂志, 2015, 34(7): 2030-2040.
- [13] 韩大勇,杨永兴,杨杨,李珂. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式. 生态学报, 2011, 31(20): 5946-5955.
- [14] 王云川,易桂花,张廷斌,别小娟,王继斌,孙姣姣. 近 35a 若尔盖高原泥炭沼泽变化趋势与驱动力分析. 干旱区研究, 2017, 34(2): 403-410.
- [15] 甄硕,董李勤,郑茹敏,姚鹏举. 2007 年和 2016 年若尔盖高原沼泽湿地景观格局及变化. 湿地科学, 2017, 15(4): 522-525.
- [16] 陈志科,吕宪国. 两个时期若尔盖高原沼泽湿地景观格局的对比研究. 湿地科学, 2010, 8(1): 8-14.
- [17] 李珂,杨永兴,杨杨,韩大勇. 放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子. 生态学报, 2011, 31(20): 5956-5969.
- [18] Mrljen I, Fennessy S, Schaaf A, Dennis R, Slonczewski J L, Lee S, Lee J. Tile drainage and anthropogenic land use contribute to harmful algal blooms and microbiota shifts in inland water bodies. Environmental Science & Technology, 2018, 52(15): 8215-8223.
- [19] Rosenberry D O, Lewandowski J, Meinikmann K, Nützmann G. Groundwater-the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 1: effects of groundwater on hydrology. Hydrological Processes, 2015, 29(13): 2895-2921.
- [20] 闫鹏飞,展鹏飞,肖德荣,王焱,余瑞,刘振亚,王行. 模拟增温及分解界面对茭草凋落物分解速率及叶际微生物结构和功能的影响. 植物生态学报, 2019, 43(2): 107-118.
- [21] Pérez J, Martínez A, Descals E, Pozo J. Responses of aquatic hyphomycetes to temperature and nutrient availability: a cross-transplantation experiment. Microbial Ecology, 2018, 76(2): 328-339.
- [22] 高俊琴,欧阳华,徐兴良,周才平,张锋,白军红. 温度和湿度对青藏高原若尔盖沼泽湿地土壤碳氮矿化的影响//2005 青藏高原环境与变化研讨会论文摘要汇编. 桂林: 中国青藏高原研究会, 中国科学院青藏高原研究所, 国土资源部岩溶地质研究所, 中国科学院地理科学与资源研究所, 世界自然基金会中国分会, 2005: 32-33.
- [23] 孙明江,李爱农,冯文兰,雷光斌,张正健. 红原县湿地时空格局变化及其生态效应. 人民黄河, 2018, 40(2): 69-75.
- [24] 许凤娇,周德民,张翼然,牛振国. 中国湖泊、沼泽湿地的空间分布特征及其变化. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1606-1614.
- [25] 李志威,王兆印,张晨笛,韩鲁杰,赵娜. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机制. 水科学进展, 2014, 25(2): 172-180.
- [26] 张云萍,刘石宁,徐志伟,董彦民,王升忠. 长白山白江河天然和排水泥炭沼泽土壤酶活性研究. 湿地科学, 2019, 17(4): 445-452.
- [27] 张晓堂,田昆,袁杰,岳海涛,张昆. 积水条件对若尔盖典型高寒沼泽碳氮垂直分布的影响. 西南林业大学学报, 2017, 37(2): 116-121.
- [28] 解成杰,郭雪莲,余磊朝,许静. 滇西北高原纳帕海湿地土壤氮矿化特征. 生态学报, 2013, 33(24): 7782-7787.
- [29] 崔丽娟,马琼芳,郝云庆,高常军,宋洪涛,王义飞,李伟. 若尔盖高寒沼泽植物群落与环境因子的关系. 生态环境学报, 2013, 22(11): 1749-1756.
- [30] 韩大勇,杨永兴,杨杨. 若尔盖高原退化沼泽群落植物多样性及种间相关性沿排水梯度的变化. 植物生态学报, 2012, 36(5): 411-419.
- [31] 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国. 季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响. 环境科学, 2016, 37(2): 697-702.
- [32] 孙祥,朱广伟,笱文怡,余茂蕾,杨文斌,朱梦圆,许海,国超旋,余丽,李恒鹏,李慧赞. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响. 环境科学, 2018, 39(6): 2632-2640.
- [33] 程丽. 淹水对三峡库区消落带土壤氮形态分布及相关酶、细菌的影响. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [34] 余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,姜泉良,刘大庆,李帅东. 夏季滇池和入滇河流氮、磷污染特征. 湖泊科学, 2016, 28(5): 961-971.