

贵州草海湿地不同水位梯度土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比分布特征*

杨羽^{1,2}, 夏品华^{1,2**}, 林陶^{1,2}, 严定波^{1,2}, 宋旭^{1,2}, 马莉^{1,2}, 汤向宸^{1,2}

(1: 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

(2: 贵州师范大学高原湿地生态与环境研究中心, 贵阳 550001)

摘要: 对贵州草海湿地 4 种水位梯度下(农田区、过渡区、浅水区和深水区)表层土壤(0~10 cm)碳、氮、磷含量及其生态化学计量比进行研究, 以期揭示草海湿地不同水位梯度下土壤碳、氮、磷生态化学计量比的分布特征及其影响因素。结果表明: 土壤总有机碳(TOC)、总氮(TN)及总磷(TP)含量在不同水位梯度之间均差异显著, 由过渡区至深水区, 土壤 TOC 及 TN 含量均呈递增趋势, 而 TP 含量呈先降低后增加的趋势; 农田区土壤 TN 含量显著高于浅水区, 但深水区土壤 TP 含量显著低于农田区。不同水位梯度土壤碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)和氮磷比(N/P)也存在显著差异, 由过渡区至深水区, 土壤 C/P 和 N/P 均呈递增趋势, 而 C/N 呈先增加后降低的趋势; 与过渡区相比, 农田区土壤 C/N、C/P 和 N/P 总体偏低。相关性分析表明: 土壤 C/N、C/P 和 N/P 的空间分布与土壤 TOC、TN、含水量等理化性质有关。可见, 草海湿地水位变化对土壤 TOC、TN 和 TP 含量以及 C/N、C/P 及 N/P 的空间分布具有显著影响, 且水位升高有利于增强土壤碳、氮、磷的固存潜力。

关键词: 水位梯度; 生态化学计量比; 贵州草海湿地

Spatial distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and their ecological stoichiometry along a water gradient in Caohai wetland, Guizhou Province*

YANG Yu^{1,2}, XIA Pinhua^{1,2**}, LIN Tao^{1,2}, YAN Dingbo^{1,2}, SONG Xu^{1,2}, MA Li^{1,2} & TANG Xiangchen^{1,2}

(1: Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, P.R.China)

(2: Plateau Wetland Ecology and Environment Research Center, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, P.R.China)

Abstract: Top soils (0–10 cm) were collected along a water gradient in three sampling belts in Caohai wetland of Guizhou Province, including agricultural areas, transition areas, shallow-water areas and deep-water areas. Soil total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total phosphorous (TP) and their ecological stoichiometry in different water levels were measured to investigate their horizontal distribution patterns, as well as their influencing factors. Our results showed that the difference of TOC, TN and TP contents were significant in four water gradients. The soil TOC and TN contents gradually increased from the transition areas to the deep-water areas, while the TP content firstly decreased and then increased. The soil TN content in agricultural areas were significantly higher than that in the shallow-water areas, but TP content in the deep-water areas were significantly lower than that in the agricultural areas. The difference of soil C/N, C/P and N/P ratios were significant in four water levels. The soil C/P and N/P ratios gradually increased from the transition areas to the deep-water areas, while the C/N ratios firstly increased and then decreased. Compared with the transition areas, the soil C/N, C/P, and N/P ratios in the agricultural areas were lower. Correlation analysis showed that the spatial distribution of soil C/N, C/P and N/P ratios were related to soil physical and chemical properties such as TOC, TN and water content. In summary, the hydrology significantly affects the spatial distribution of soil TOC, TN, TP, C/N,

* 2019-05-31 收稿; 2019-08-21 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41867056)、贵州省重大科技专项课题(20163022-2)和贵州师范大学博士基金项目联合资助。

** 通信作者; E-mail: pinhuayy@163.com.

C/P and N/P ratios in Caohai wetland, and the accumulation of soil carbon and nitrogen will be enhanced when the water level rises.

Keywords: Water level gradient; ecological stoichiometry; Guizhou Caohai wetland

生态化学计量学是研究生态系统能量及元素平衡的重要学科^[1],为研究生态系统物质循环提供了一种新的思路和方法^[2]. 土壤碳、氮、磷化学计量关系具有良好的指示作用,对于揭示碳、氮、磷元素的矿化作用及其生物地球化学循环具有重要意义,如土壤碳氮比(C/N)是土壤质量的敏感指标,可反映有机质分解程度^[3];碳磷比(C/P)通常被认为是土壤有机磷矿化能力的象征^[4]. 湿地生态系统具有独特的水文、土壤、植被和生物特征,其土壤承担着碳、氮及磷元素的“源”、“汇”和“转化器”等多项重要生态功能^[5]. 然而,湿地水文条件是影响湿地结构和功能的主要因素,它们可通过改变植被群落结构、土壤氧化还原条件、微生物及酶活性、养分的输入及输出,进而影响土壤养分含量及其化学计量关系^[6-7]. 因此,研究水文变化对湿地生态系统土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响,对认识湿地生态系统碳、氮、磷元素的循环和平衡机制具有重要意义.

近年来,不同水文条件下湿地土壤碳、氮、磷化学计量比的分布特征得到了广泛关注^[6-8],主要集中于鄱阳湖^[9]、东洞庭湖^[6]、闽江河口^[7]及黄河三角洲^[8]等湿地. 付珊等研究鄱阳湖南矶湿地发现,不同水位梯度下土壤C/N比保持相对稳定状态,而C/P、氮磷比(N/P)存在显著差异,土壤C/N、C/P比的变化主要受土壤总有机碳(TOC)含量调控,N/P比主要取决于总氮(TN)含量^[9];但也有些研究发现不同水文条件下土壤C/N、C/P、N/P均存在显著差异^[6,10],植物群落^[6]及土壤含水量(WC)^[10]是影响土壤C/N、C/P、N/P比分布的关键因素. 可见,水文条件对淡水湿地土壤碳氮磷化学计量比分布特征的影响及其与环境因子的关系尚无定论. 因此,进一步研究不同水文条件下湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比分布特征及其影响因素,对丰富湿地土壤生态化学计量学的研究具有重要价值.

贵州草海是西南地区具有代表意义的喀斯特天然淡水湖泊湿地,是国家一级保护动物黑颈鹤(*Grus nigricollis*)的重要越冬栖息地^[11]. 随着社会经济的发展,贵州草海湿地受旅游开发、围湖造田和村镇生活污水直接排放等多重人为活动影响,湿地生态系统趋于退化状态^[12-13]. 为恢复草海湿地生态系统完整性,相关部门提出建设出水闸和生态补水等措施,以期将原有水位从2171.7 m抬升至2173.0 m,水域面积由25 km²扩增至33 km². 但随着相关措施的实施,未来草海水位的抬升将致使湖泊周边农田被淹没,原有湖区水位升高,最终可能导致农田和原有湖区土壤碳、氮、磷等元素的迁移转化发生不同程度的改变. 因此,研究不同水位梯度下表层土壤碳、氮、磷化学计量比的空间分布及其影响因素,可以为研究未来水位变化对草海土壤碳、氮、磷元素循环的影响提供重要依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(26°49'~26°53'N, 104°12'~104°18'E)位于贵州省威宁县草海自然保护区,是一个天然喀斯特高原淡水湖泊湿地生态系统. 贵州草海所在地区属亚热带季风气候,丰水期为每年的5—10月份,年平均降雨量在950.9 mm左右. 草海湖区水源主要来自大气降水和地下水补给,最大水深5.25 m,平均水深2.35 m. 草海湿地水生植被呈带状分布,由陆生型中生、湿生群落逐渐变化为水生型挺水、沉水群落^[14],沉水植被有金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、狐尾藻(*Myriophyllum demersum*)、光叶眼子菜(*Potamogeton lucens*)、海菜花(*Ottelia acuminata*)等,挺水植被是蘆草(*Scirpus triquetus*)、水葱(*S. tabernaemontani*)、水烛(*Typha angustifolia*)、双穗雀稗(*Paspalum distichum*)、芦苇(*Phragmites communis*)、荆三棱(*Scirpus fluviatilis*)和灯芯草(*Juncus riangui*)等.

1.2 样品采集与处理

于2017年8月上旬,对贵州草海湿地3个样区进行采样,分别为刘家巷、王家院子和胡叶林(图1),刘家巷位于草海湿地湖泊上游,靠近威宁县城;王家院子位于湖泊中游,附近村庄较少;胡叶林位于下游,周边村庄较多. 根据水位梯度在每个样区分别设置4个样地,分别是农田区、过渡区、浅水区和深水区,共计12

个样点. 样点内随机布设 3 个(5 m×5 m)的平行样方(间隔不小于 10 m), 预先清除土壤表层杂物, 采用“S 型”采样法混采 3~5 个表层(0~10 cm)土壤样品, 装于标记好的自封袋中带回实验室. 在实验室中挑出石砾和植物根茎等杂质后, 自然风干过 100 目筛备用.

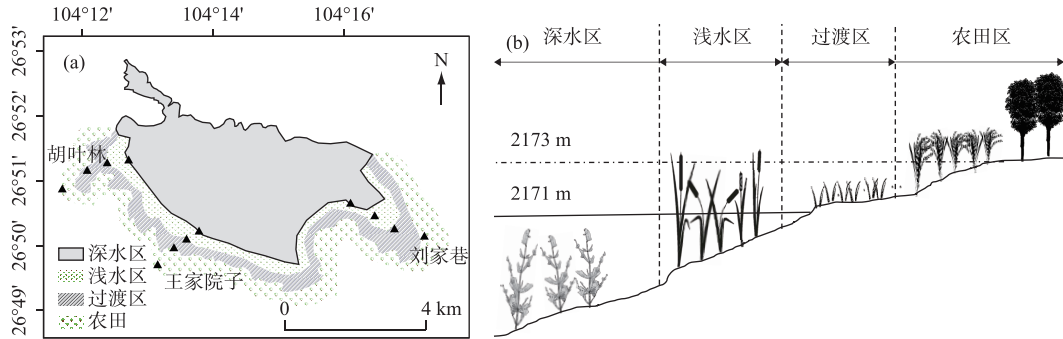


图 1 采样地理位置(a)及水位梯度剖面(b)示意图

Fig.1 Sampling geographic location (a) and water level gradient profile (b)

1.3 测定方法

水深通过标杆和卷尺进行测量, 而土壤指标测定参照《土壤农业化学分析方法》^[15]. 土壤总有机碳 (TOC) 含量测定采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法, 土壤有机质是 TOC 含量的 1.724 倍; 总氮 (TN) 含量采用凯氏定氮法; 总磷 (TP) 含量采用酸溶-钼锑抗比色法; pH 采用 1:2.5 电位法; 含水量 (WC) 采用烘干法. 结果见表 1.

表 1 样地土壤理化性质*

Tab.1 Physical and chemical properties of soil in the sampling sites

样区	水位梯度	植被	水深/cm	含水量/%	有机质/(g/kg)	pH
刘家巷	深水区	金鱼藻	130.00±10.00 ^a	46.52±0.01 ^a	116.05±5.94 ^a	7.51±0.02 ^a
	浅水区	水葱	89.00±7.94 ^b	40.78±0.06 ^b	80.31±3.99 ^b	7.41±0.07 ^b
	过渡区	芦苇	31.00±6.08 ^c	36.24±0.02 ^b	54.69±0.96 ^c	7.35±0.02 ^b
	农田区	玉米	—	27.34±0.02 ^c	66.23±0.41 ^d	6.08±0.03 ^d
王家院子	深水区	尖叶眼子菜	193.00±11.68 ^a	57.44±0.06 ^a	56.86±2.56 ^a	7.54±0.04 ^a
	浅水区	水葱	131.00±18.58 ^b	38.14±0.02 ^b	37.33±0.78 ^b	7.05±0.05 ^b
	过渡区	双穗雀稗	73.00±16.70 ^c	33.52±0.02 ^b	28.65±1.09 ^c	6.63±0.11 ^c
	农田区	玉米	—	25.01±0.02 ^c	17.08±1.64 ^d	6.87±0.03 ^d
胡叶林	深水区	光叶眼子菜	264.00±18.01 ^a	50.19±0.05 ^a	87.02±3.11 ^a	7.62±0.07 ^a
	浅水区	水烛	132.00±14.01 ^b	39.09±0.01 ^b	39.65±2.09 ^b	7.47±0.03 ^b
	过渡区	双穗雀稗	82.00±11.06 ^c	32.61±0.03 ^c	20.28±1.09 ^c	7.40±0.02 ^b
	农田区	玉米	—	26.19±0.02 ^d	44.05±1.55 ^d	6.17±0.03 ^d

* 表中数据为平均值±标准差; 数据右边不同小写字母表示同研究区不同水位之间差异显著 (P<0.05).

1.4 统计与分析

本研究中土壤 C/N、C/P、N/P 均为元素质量比, 数据分析使用 SPSS 21 软件, 制图采用 Origin 9.0 软件. 利用双因素方差分析水位、样区及两者交互作用对土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比的影响. 采用单因素对不同水位梯度(或不同样区)土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比进行差异性分析; TOC、TN、C/N 因方差齐性检验结果大于 0.1, 故采用 Tamhane 进行多重比较; 而 TP、C/P、N/P、WC、pH 方差齐性检验结果小于 0.05, 故采用 LSD 进行多重比较. 在进行 Pearson 相关性双尾检验之前, 已对数据进行正态分布检验, 结果符合要求.

2 结果与分析

2.1 不同水位梯度土壤有机碳、总氮、总磷分布特征

不同水位梯度土壤 TOC、TN、TP 含量变化分别在 9.91~67.31、1.84~3.93 和 0.33~0.58 g/kg 之间,平均值分别为 31.33、2.68 和 0.42 g/kg(图 2)。水位、样区显著影响土壤 TOC、TN 及 TP 的空间分布(表 2)。

同一样区,不同水位梯度土壤 TOC、TN、TP 含量差异显著($P<0.05$)。在 3 个样区中,由过渡区至深水区,土壤 TOC、TN 含量均呈增加趋势,深水区显著高于其他水位梯度($P<0.05$),农田区 TN 含量显著高于浅水区($P<0.05$)。在 3 个样区中,农田区土壤 TP 含量最高,且与其他水位梯度差异显著($P<0.05$),刘家巷深水区土壤 TP 含量显著高于过渡区及浅水区($P<0.05$),而王家院子及胡叶林土壤 TP 含量在深水区、浅水区及过渡区之间差异不显著($P>0.05$)。

同一水位梯度,不同样区土壤 TOC、TN 及 TP 含量也存在差异。在深水区、浅水区及过渡区下,刘家巷土壤 TOC 含量显著高于胡叶林及王家院子($P<0.05$);在过渡区及浅水区,刘家巷土壤 TN 含量均显著高于胡叶林及王家院子($P<0.05$);在深水区,刘家巷土壤 TP 含量显著高于胡叶林及王家院子($P<0.05$)。

表 2 双因素方差分析检验水位、样区及两者交互作用对土壤养分的影响

Tab.2 Two-way ANOVA to test the effects of water gradient, sample region and their interaction on soil nutrients

可变因素	水位		样区		水位 × 样区	
	F	P	F	P	F	P
有机碳	701.93	<0.001	925.84	<0.001	45.06	<0.001
总氮	100.39	<0.001	21.54	<0.001	1.12	>0.001
总磷	305.95	<0.001	42.01	<0.001	35.54	<0.001
碳氮比	29.79	<0.001	82.16	<0.001	6.01	<0.001
碳磷比	357.22	<0.001	411.61	<0.001	25.09	<0.001
氮磷比	115.42	<0.001	25.21	<0.001	7.65	<0.001

2.2 不同水位梯度土壤碳、氮、磷化学计量比分布特征

不同水位梯度土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别在 4.14~17.64、22.78~154.21 和 4.45~9.36 之间,平均值分别为 11.26、77.17 和 6.53(图 2)。水位、样区及两者交互作用极显著地影响土壤 C/N、C/P 和 N/P 的空间分布(表 2)。

同一样区,不同水位梯度土壤 C/N、C/P 及 N/P 差异显著($P<0.05$)。在 3 个样区中,不同水位梯度土壤 C/N 均值大小规律表现为农田区(8.70)<过渡区(9.67)<深水区(13.28)<浅水区(13.40),过渡区与农田区差异不显著($P>0.05$),深水区与浅水区差异也不显著($P>0.05$),但深水区与农田区差异显著($P<0.05$);土壤 C/P 表现为农田区(44.72)<过渡区(55.50)<浅水区(86.86)<深水区(121.58),过渡区与农田区差异不显著($P>0.05$),但过渡区与浅水区、深水区差异显著($P<0.05$);土壤 N/P 比均值表现为农田区(5.22)<过渡区(5.50)<浅水区(6.23)<深水区(9.21),深水区与农田区、过渡区、浅水区差异显著($P<0.05$)。

同一水位梯度,3 个样区土壤 C/N、C/P、N/P 存在显著差异。在深水区、浅水区及过渡区下,刘家巷土壤 C/N、C/P 显著高于王家院子及胡叶林($P<0.05$)。在过渡区及浅水区,刘家巷土壤 N/P 均显著高于胡叶林及王家院子($P<0.05$)。

2.3 土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比与土壤理化因子的关系

Pearson 相关性分析结果如表 3 所示,土壤 TOC 与 TN、C/N、C/P 及 N/P 比呈极显著正相关($P<0.01$);土壤 TN 与 N/P 比呈极显著正相关($P<0.01$);土壤 TP 与 C/N、C/P 及 N/P 比相关性不显著($P>0.05$)。土壤 WC 与 TN、N/P 及 C/P 比显著正相关($P<0.05$);土壤 pH 与 TP 极显著负相关($P<0.01$),而与 N/P 比显著正相关($P<0.05$)。

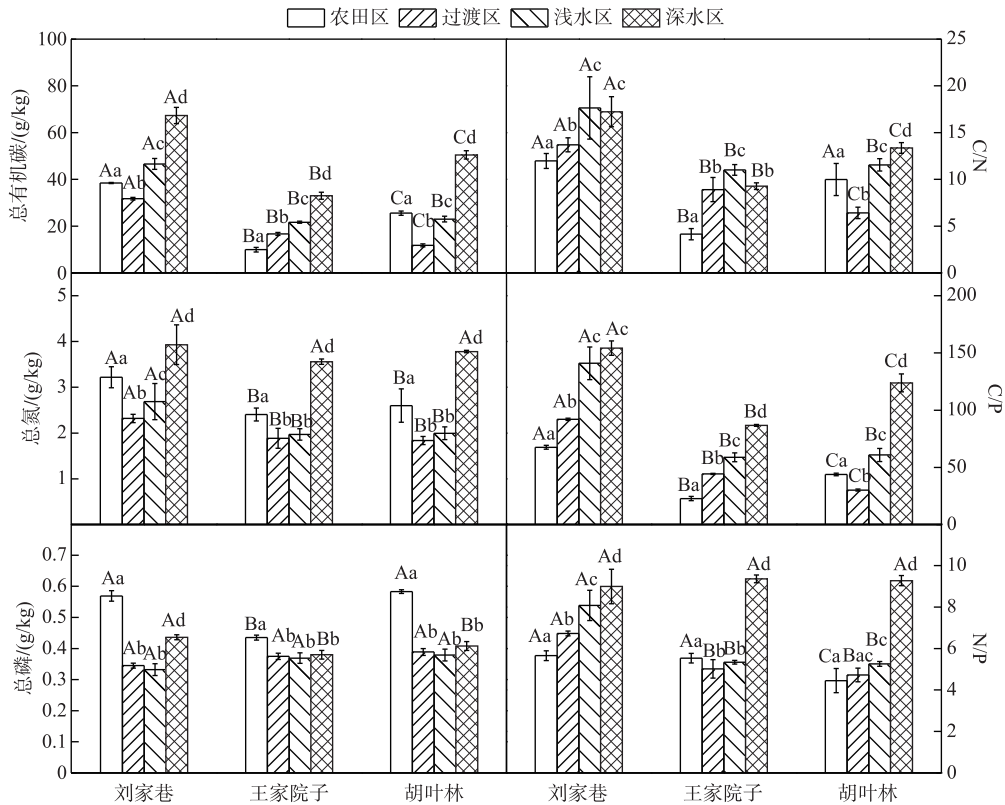


图2 不同水位梯度土壤总有机碳、总氮、总磷含量及其化学计量比
 (图中误差线为标准误差,小写字母表示同一样区不同水位梯度间差异显著性($P < 0.05$),
 大写字母表示相同水位梯度不同样区之间差异显著性($P < 0.05$))

Fig.2 The contents of soil TOC, TN, TP and their ecological stoichiometry along different water level gradients

表3 土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比与土壤物理因子的相关性分析
 Tab.3 Correlation analysis among soil physical properties, soil carbon, nitrogen,
 phosphorus contents and their stoichiometric ratios

	含水量	pH	总有机碳	总氮	总磷	碳氮比	碳磷比	氮磷比
含水量	1							
pH	0.756 **	1						
总有机碳	0.562	0.312	1					
总氮	0.577 *	0.193	0.829 **	1				
总磷	-0.476	-0.773 **	0.064	0.285	1			
碳氮比	0.428	0.287	0.867 **	0.472	-0.127	1		
碳磷比	0.667 *	0.517	0.946 **	0.702 *	-0.241	0.903 **	1	
氮磷比	0.856 **	0.630 *	0.785 **	0.824 **	-0.298	0.561	0.848 **	1

* 表示显著相关($P < 0.05$) ; ** 表示极显著相关($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 不同水位梯度土壤总有机碳、总氮、总磷的空间异质性

在3个样区中,由过渡区至深水区,水位逐渐升高,且越靠近湖心,土壤 TOC、TN 含量越高,这与闫玉琴

等^[16]及张珍明等^[17]的研究结果一致. 这是因为水文条件可通过改变植被群落类型、土壤水分含量、微生物及酶活性,进而影响湿地土壤养分的输入及输出^[6-7]. 在3个样区中,深水区土壤 TOC、TN 及 TP 含量高于过渡区和浅水区(图2),其原因是深水区沉水植物及藻类生长茂盛^[13],其凋落物大量沉积湖底,致使土壤 TOC、TN 及 TP 输入量增加;此外,深水区土壤常年处于渍水状态,形成高水分、低温及厌氧环境,导致土壤脲酶^[18]、多酚氧化酶、 β -葡萄糖苷酶及碱性磷酸酶活性受到抑制,好氧性细菌数量降低^[19],进而不利于土壤有机碳、有机氮及有机磷的矿化作用. 已有研究表明,草海农户对农作物的施肥以复合肥和尿素为主,有机肥占 28.89%^[20],这可能是导致农田区 TN 含量显著高于过渡区的原因之一. 另外,与农田区相比,过渡区位于水陆交界处,干湿交替作用明显,造成土壤团聚体裂解,释放大物理保护的营养物质,增加了微生物数量及活性,从而加速了土壤脱氮过程^[21]. 前人研究表明,与泥炭地相比,具有高铁/铝/硅氧化物的矿质土壤是更好的磷汇^[22]. 本研究中,农田区位于草海湖泊周围,成土母质以第四纪红色黏土为主^[23],红黏土含有非常多的铁/铝/硅氧化物,为磷酸盐提供了更多吸附位点,而过渡区、浅水区及深水区位于沼泽和湖泊,成土母质以淤泥和泥炭为主^[24],从而导致农田区土壤 TP 含量显著高于过渡区、浅水区及深水区. 此外,农业生产施用大量的化肥及有机肥^[20],这直接增加了农田区土壤 TP 含量. 草海湿地同一水位梯度土壤 TOC、TP 含量的分布特征呈现出明显的区域性. 刘家巷位于草海湖泊东部,靠近威宁县城,极易受城市生活污水和周边农业面源输入的影响,导致大量陆源有机质通过地表径流进入湖泊,并汇集在湖泊深水区^[17],因此,在深水区,刘家巷土壤 TOC、TP 含量显著高于王家院子及胡叶林(图2). 可见,未来草海湿地水位抬升,有利于增强土壤碳、氮、磷的固存潜力,但应考虑外源输入的影响.

3.2 不同水位梯度土壤碳、氮、磷生态化学计量比的空间异质性

土壤 C/N、C/P 及 N/P 是碳、氮、磷元素总质量的比值^[1]. 研究区土壤 C/N 均值(11.26)与洞庭湖湿地(10.59)^[6]、鄱阳湖湿地(11.17)^[25]及中国土壤均值(12.00)^[26]接近,但土壤 C/P 和 N/P 均值(77.17 和 6.53)高于鄱阳湖湿地(52.74 和 5.03)^[26]和洞庭湖湿地(25.30 和 2.44)^[6],表明在大的地理空间尺度上,土壤 C/N 保持相对稳定^[26-27],而土壤 C/P、N/P 的变异性较大. 在3个样区中,土壤 C/N、C/P 及 N/P 在不同水位梯度之间差异显著($P < 0.05$),这与 Hu 等^[6]和李兴福等^[10]的研究结果一致,说明在区域尺度上土壤 C/N、C/P 及 N/P 的空间分布受水文条件影响^[28].

土壤碳、氮、磷含量的空间异质性将导致土壤 C/P、C/P 及 N/P 也表现出一定的空间变异性^[29]. 在3个样区中,由过渡区至深水区,土壤 C/P 的变化规律与 TOC 含量保持一致(图2),而 N/P 比的变化规律与 TN 保持一致(图2),这是因为土壤 C/P 主要受 TOC 含量调控,而土壤 N/P 主要取决于 TN 含量^[9]. 相关分析表明,土壤 WC 与 C/P、N/P 呈显著正相关($P < 0.05$),表明土壤 WC 在决定土壤 C/P、N/P 方面起着重要作用^[6],这是因为高土壤水分有利于土壤碳和氮的积累^[30]. 以适应高速生长的物种(如蔬菜),农业生态系统的土壤通常具有更低 C/N、C/P 及 N/P 和更高 TP 含量特征^[31]. 草海农户为了使玉米快速生长(表1),施用大量氮肥、磷肥及有机肥^[20],这可能是导致农田区土壤 C/N、C/P 及 N/P 较低的主要原因.

3.3 不同水位梯度土壤碳、氮、磷生态化学计量比的指示作用

土壤 C/N 可反映有机质分解程度^[3],当土壤 C/N > 25(基于质量)时,表明有机质积累比分解更快^[32-33],土壤 C/N 在 12~16 之间时,表明有机质被微生物很好地分解^[34]. 另外,土壤 C/N 与有机质分解过程所释放的有效氮呈反比,C/N 越小,有机质分解过程中释放有效氮潜力越大^[27]. 在3个样区中,不同水位梯度土壤 C/N 均值表现为农田区(8.70) < 过渡区(9.67) < 深水区(13.28) < 浅水区(13.40),表明不同水位梯度土壤有机质均可能处于易分解状态,但沿水位升高土壤有机质分解作用和有效氮释放潜力逐渐减弱. 如表1所示,沿水位升高,3个样区土壤有机质含量呈增加趋势,这进一步证明水位升高能够抑制土壤有机质分解. 农田区土壤有机质分解作用和有效氮释放潜力最强,这主要是因为该区土壤含水量较低和通气较好^[31].

Paul 的研究表明,土壤 C/P 被认为是有机磷矿化能力的象征,C/P < 200 意味着有机磷净矿化,C/P > 300 表明有机磷净固定,C/P 在 200~300 之间意味着可溶性磷几乎没有变化^[4]. 此外,土壤 C/P 与有机质分解过程所释放的有效磷含量呈反比,C/P 比越小,有机质分解过程中释放有效磷的潜力越大^[35]. 在3个样区中,不同水位梯度土壤 C/P 均值表现为农田区(44.72) < 过渡区(55.50) < 浅水区(86.86) < 深水区

(121.58),表明不同水位梯度土壤均可能出现有机磷净矿化风险,但沿水位升高土壤有机磷净矿化作用和有效磷释放潜力逐渐减弱.张珍明等的研究表明^[17],草海湿地土壤有效磷含量分布规律为农用地>底泥,这与本研究农田区有效磷释放潜力高,而深水区释放潜力低的结果相符.

4 结论

1)草海湿地水位条件对土壤 TOC、TN 和 TP 含量的空间分布具有显著影响,由过渡区至深水区,土壤 TOC 和 TN 含量呈增加趋势,而深水区土壤 TP 含量显著高于过渡区及浅水区,表明水位升高可增强湿地土壤碳、氮、磷固存潜力.

2)草海湿地水位条件对土壤 C/N、C/P 和 N/P 的空间分布影响较大,农田区土壤 C/N、C/P 和 N/P 最低,由过渡区至深水区,土壤 C/P 和 N/P 均呈递增趋势,而 C/N 呈先增加后降低趋势.土壤 C/N、C/P 和 N/P 的空间分布与土壤 TOC、TN、WC 等理化性质有关.

3)草海湿地土壤 C/N 和 C/P 较低,有机质和有机磷均处于易分解状态,但水位升高能够抑制土壤有机质及有机磷分解作用.

5 参考文献

- [1] Wang SQ, Yu GR. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3937-3947. [王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征.生态学报,2008,**28**(8):3937-3947.]
- [2] Xing W, Wu YP, Shi Q *et al.* Ecological stoichiometry theory: a review about applications and improvements. *Ecological Science*, 2015, **34**(1): 190-197. [邢伟,吴昊平,史俏等.生态化学计量学理论的应用、完善与扩展.生态科学,2015,**34**(1):190-197.]
- [3] Elser J. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, 2003, **6**(10): 936-943. DOI:10.1046/j.1461-0248.2003.00518.x.
- [4] Paul EA ed. Soil microbiology, ecology, and biochemistry. London: Academic Press, 2006.
- [5] Reddy KR, Delaune RD. Biogeochemistry of wetlands: science and applications. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, **73**(2): 1779. DOI: 10.2136/sssaj2008.0013br.
- [6] Hu C, Li F, Xie YH *et al.* Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of three dominant plant communities distributed along a small-scale elevation gradient in the East Dongting Lake. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, **103**: 28-34. DOI: 10.1016/j.pce.2017.04.001.
- [7] Wang W, Sardans J, Wang C *et al.* Shifts in plant and soil C, N and P accumulation and C: N: P stoichiometry associated with flooding intensity in subtropical estuarine wetlands in China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018: 172-184. DOI: 10.1016/j.ecss.2018.09.026.
- [8] Lu Q, Bai J, Zhang G *et al.* Spatial and seasonal distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur and their ecological stoichiometry in wetland soils along a water and salt gradient in the Yellow River Delta, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, **104**: 1-102. DOI: 10.1016/j.pce.2018.04.001.
- [9] Fu S, Wu Q, Pei B *et al.* Distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus scaling ratios along the water level gradient in Nanji Wetland. *Wetland Science*, 2015, **13**(3): 374-380. [付姗,吴琴,尧波等.南矶湿地土壤碳、氮、磷化学计量比沿水位梯度的分布.湿地科学,2015,**13**(3):374-380.]
- [10] Li XF, Su DR, Lv SH *et al.* Comparison of soil carbon, nitrogen, and phosphorus characteristics of Hulun Buir grassland under different flooding conditions in the Hui River wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(6): 2204-2212. DOI: 10.5846/stxb201701180157. [李兴福,苏德荣,吕世海等.呼伦贝尔草原辉河湿地不同淹水状态的土壤碳氮磷特征比较.生态学报,2018,**38**(6):2204-2212.]
- [11] Ren XX, Chen YX, Feng T *et al.* A review on Caohai wetland in Weining of Guizhou province. *Journal of Guizhou University of Engineering Science*, 2017, **35**(3): 23-39. [任秀秀,陈永祥,冯图等.贵州威宁草海湿地的研究现状.贵州工程应用技术学院学报,2017,**35**(3):23-39.]
- [12] Zhang JC, Lin CH, Lin SX *et al.* The migration and enrichment characteristics of heavy metals in soil-plant system in dif-

- ferent functional areas of Caohai Basin, Guizhou. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(2): 169-174. [张家春, 林昌虎, 林绍霞等. 贵州草海流域不同功能区土壤-植物系统重金属迁移与富集特征. 水土保持学报, 2014, **28**(2): 169-174.]
- [13] Yang HQ, Chen JA, Liu W *et al.* Distribution characteristics and controlling factors of total organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus in sediments of Caohai Lake, China. *Earth and Environment*. 2016, **44**(3): 297-303. [杨海全, 陈敬安, 刘文等. 草海沉积物营养元素分布特征与控制因素. 地球与环境, 2016, **44**(3): 297-303.]
- [14] Shan BQ, Wang G. A quantitative study on the aquatic vegetation succession of the Caohai Lake. *Acta Prataculturae Sinica*, 1998, **7**(2): 24-34. [单保庆, 王刚. 草海水生植被演替系列的数量研究. 草业学报, 1998, **7**(2): 24-34.]
- [15] Lu RK ed. Soil chemical analysis method in agriculture. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [16] Yan YQ, Xie G, Xiang Y *et al.* Spatial distribution and ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in lake littoral zone sediment in Mu Us Sand land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(2): 223-228. [闫玉琴, 解刚, 项宇等. 毛乌素沙地湖滨带沉积物碳氮磷生态化学计量学特征. 水土保持学报, 2018, **32**(2): 223-228.]
- [17] Zhang ZM, Lin SX, Zhang QH *et al.* Distribution characteristics under different land use of soil carbon, nitrogen and phosphorus patterns in Caohai Plateau Wetland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(6): 199-204. [张珍明, 林绍霞, 张清海等. 不同土地利用方式下草海高原湿地土壤碳、氮、磷分布特征. 水土保持学报, 2013, **27**(6): 199-204.]
- [18] Huang JY, Song CC, Song YY *et al.* Influence of freshwater marsh tillage on microbial biomass and dissolved organic carbon and nitrogen. *Environmental Science*, 2008, **29**(5): 1380-1387. [黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响. 环境科学, 2008, **29**(5): 1380-1387.]
- [19] Fenner N, Freeman C, Reynolds B. Hydrological effects on the diversity of phenolic degrading bacteria in a peatland: implications for carbon cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(7): 1277-1287. DOI: 10.1016/j.soilbio.2004.11.024.
- [20] Yu JL, Yang YK, Hu H *et al.* Investigation on current situation of corps' fertilization in Caohai Area of Weining. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015, (9): 51-54. [于健龙, 杨永奎, 胡辉等. 威宁草海种植区作物施肥现状调查. 湖南农业科学, 2015, (9): 51-54.]
- [21] Smith M, Tiedje J. Phases of denitrification following oxygen depletion in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1979, **11**: 261-267. DOI: 10.1016/0038-0717(79)90071-3.
- [22] Richardson CJ. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands. *Science*, 1985, **228**(4706): 1424-1427. DOI: 10.1126/science.228.4706.1424.
- [23] Cai XL, Huang XZ, Liao DP. Analysis of chemical properties of farmland soil in Caohai national nature reserve. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2010, (3): 60-61. [蔡晓玲, 黄小柱, 廖德平. 草海国家级自然保护区耕地土壤化学性质分析. 内蒙古农业科技, 2010, (3): 60-61.]
- [24] Peng YS, Yang RD. Environmental change of Caohai Lake, Guizhou Province from 730 ka to present and future evolution. *Journal of Earth Environment*, 2014, **5**(3): 194-206. DOI: 10.7515/JEE201403003. [彭益书, 杨瑞东. 贵州草海湿地 730ka 来的环境变迁及草海未来的演化分析. 地球环境学报, 2014, **5**(3): 194-206.]
- [25] Lei XM, Duan HL, Liu WF *et al.* Soil nutrients and stoichiometry along elevation gradients in shallow-lakes of Poyang Lake Wetland. *Soil*, 2017, **49**(1): 40-48. [雷学明, 段洪浪, 刘文飞等. 鄱阳湖湿地碟形湖泊沿高程梯度土壤养分及化学计量研究. 土壤, 2017, **49**(1): 40-48.]
- [26] Tian HQ, Chen GS, Zhang C *et al.* Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils; a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1/3): 139-151. DOI: 10.1007/s10533-009-9382-0.
- [27] Cleveland CC, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil; is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?. *Biogeochemistry*, 2007, **85**(3): 235-252. DOI: 10.2307/20456544.
- [28] Jiang YJ, Li SJ, Shen DF *et al.* Climate change and its impact on the lake environment in the Tibetan Plateau in 1971-2008. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, **32**(12): 1503-1512. DOI: 10.1007/s11783-011-0280-z. [姜永见, 李世杰, 沈德福等. 青藏高原近 40 年来气候变化特征及湖泊环境响应. 地理科学, 2012, **32**(12): 1503-1512.]
- [29] Xiao Y, Shang L, Huang ZG *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in

- mountain swamps of Eastern Jilin Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(8): 994-1001. [肖焯, 商丽娜, 黄志刚等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征. 地理科学, 2014, **34**(8): 994-1001.]
- [30] Loomis MJ, Craft CB. Carbon sequestration and nutrient (nitrogen, phosphorus) accumulation in river-dominated tidal marshes, Georgia, USA. *Soil Science Society of America*, 2012, **74**: 1028-1036. DOI: 10.2136/sssaj2009.0171.
- [31] Wang WQ, Wang C, Sardans J *et al.* Agricultural land use decouples soil nutrient cycles in a subtropical riparian wetland in China. *Catena*, 2015, **133**: 171-178. DOI: 10.1016/j.catena.2015.05.003.
- [32] Wei X, Shao M, Fu X *et al.* Distribution of soil organic C, N and P in three adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China. *Biogeochemistry*, 2009, **96**(1/2/3): 149-162. DOI: 10.1007/s10533-009-9350-8.
- [33] Zhao FZ, Sun J, Ren CJ *et al.* Land use change influences soil C, N, and P stoichiometry under ‘Grain-to-Green Program’ in China. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 10195. DOI: 10.1038/srep10195.
- [34] Bui EN, Henderson BL. C : N : P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1/2): 553-568. DOI: 10.1007/s11104-013-1823-9.
- [35] Peng PQ, Zhang WJ, Tong CL *et al.* Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting lake flood plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(10): 1872-1878.