

毛乌素沙地湖滨带沉积物碳氮磷生态化学计量学特征

闫玉琴¹, 解刚², 项宇³, 夏国彤¹, 申卫博^{1,4}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院,

北京 100048; 3. 长江水利委员会长江流域水土保持监测中心站, 武汉 430010;

4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了阐明毛乌素沙地湖滨带沉积物生态化学计量学特征及其指示意义, 对不同类型区湖滨带沉积物有机碳、全氮和全磷含量进行了测定与分析。结果表明: 不同类型区湖滨带沉积物有机碳和全氮含量变化趋势一致, 表现为距离湖泊中心位置愈远其含量愈低; 湖滨带沉积物有机碳、全氮、全磷含量剖面分布具有一定层次性, 表现为 0—10 cm > 10—20 cm > 20—40 cm, 湖滨带沉积物全磷的变化相对滞后于有机碳和全氮, 其水平分布特征与有机碳和全氮不同, 剖面分布相似; 土壤含水率和土壤容重是影响沉积物养分分布的关键因子, 同时也是影响 C/P 和 N/P 变化的主要因素; 生态化学计量学特征分析表明, 除相对远离湖泊中心的类型区 C/N 和 C/P 与土壤碳储量的变化趋势一致外, 靠近湖泊中心的类型区碳与养分比值未表现出对土壤碳储量良好的指示作用。

关键词: 湖滨带沉积物; 有机碳; 全氮; 全磷; 生态化学计量学

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0223-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.033

Spatial Distribution and Ecological Stoichiometry Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Lake Littoral Zone Sediment in Mu Us Sandland

YAN Yuqin¹, XIE Gang², XIANG Yu³, XIA Guotong¹, SHEN Weibo^{1,4}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048; 3. Yangtze River Water Resources Commission Yangtze River Basin Water and Soil Conservation Monitoring Center, Wuhan 430010; 4. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Taking Mu Us sandland as the study areas, the ecological stoichiometric characteristics of wetland soils with different types and their indications were studied. Results showed that: (1) The distribution of organic carbon and total nitrogen contents appeared the same tendency, Their contents were declined with the distance from the center of the lake. (2) The vertical distribution of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in the sediments of the lakeside zone were declined with the depth of soil layer, their contents were in the order of 0—10 cm > 10—20 cm > 20—40 cm. The variation of total phosphorus in the sediments of the lakeside zone lagged behind organic carbon and total nitrogen, and the horizontal distribution of the total phosphorus was different from those of organic carbon and total nitrogen, but the vertical distribution was similar to the latter two. (3) Soil water and soil bulk density were the key factors influencing the nutrient distribution and the changes of C/P and N/P ratios of sediments. Analysis of ecological stoichiometry characteristics showed that C/N, C/P and soil carbon storage in the area that far from the center of the lake appeared the same tendency, the tendency was related with the distance from the center of the lake. The C/N ratios of the area that closed to the center of the lake had no signification correlation with soil carbon storage.

Keywords: Lake Littoral Zone; organic carbon; nitrogen; phosphor; stoichiometry

生态化学计量学为探究生态系统和多种元素的平衡提供了新的思路^[1], 从而受到国内外生态学家的

广泛关注^[2-3], 与国外的生态化学计量学研究相比, 国内研究相对不足^[4]。目前, 生态化学计量学的研究主

收稿日期: 2017-10-12

资助项目: 中央财政农业技术推广专项“组合式稳定塘处理养猪场污水关键技术与示范”(K3360216072); 中国水利水电科学研究院专项“水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045)

第一作者: 闫玉琴(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事污染物迁移与调控研究。E-mail: yanyuqin0317@163.com

通信作者: 申卫博(1979—), 男, 副研究员, 主要从事水土保持研究。E-mail: shenwb@ms.iswc.ac.cn

要是在水生和陆地生态系统方面^[2,4],对介于水生和陆地生态系统过渡区的湖滨带生态系统的研究还十分有限,且主要是植物组织元素的研究^[5],对于湖滨带沉积物的生态化学计量学研究相对较少。沉积物作为湖滨带生态系统的重要组成部分,其元素生态化学计量学的研究对揭示养分的可获得性以及碳、氮、磷等元素的循环和平衡机制具有重要意义,但其研究成果相对较少^[6-7],湖滨带沉积物碳、氮、磷的生态化学计量学研究更是鲜见报道。

湖滨带即水陆交错带(aquatic-terrestrial ecotone),是湖泊水生生态系统与陆地生态系统间一种非常重要的生态过渡带。作为湖泊水体和陆地之间的过渡带,湖滨带被认为是人类活动和自然变化过程对湖泊生态系统影响最敏感的部分^[8]。湖滨带的退化往往造成植被破坏、生物多样性降低、景观美学价值下降、水质改变、洪涝灾害频繁,严重威胁到人民的身体健康和生命财产安全。随着人们对湖泊保护意识的加强,湖滨带也受到了广泛关注^[8-9]。因此,湖滨带生态系统恢复与重建已成为目前流域生态学和恢复生态学研究的重要内容之一^[10]。

毛乌素沙地是鄂尔多斯高原的主体部分,处于荒漠

草原—草原—森林草原的生态过渡地带,同时具有特殊的地理景观,是我国重要的生态屏障区,其生态环境具有脆弱性和敏感性^[11]。本研究以毛乌素沙地的典型湖泊巴吓采当作为研究对象,分析了该区域不同类型区有机碳、全氮和全磷的空间分布以及生态化学计量学特征,为合理开发和利用毛乌素沙地中湿地的生态系统功能及治理毛乌素沙地沙漠化提供一定的科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地东南缘巴吓采当湖泊(38°54'N,109°47'E),海拔 1 274.9 m。巴吓采当湖泊是秃尾河河源区的典型湖泊,位于神木县西北部锦界、尔林兔、大保当三镇交接处。该区域年均气温 7.8℃,年均降水量 400 mm,年均蒸发量 2 092 mm。20 世纪 70 年代,该湖泊面积约 30 hm²,近 30 年逐渐萎缩退化,现面积约 20 hm²。根据湖滨带距湖泊中心点远近、水位和植被特征的不同,将采样区分为 6 种环状类型区(A~F)(图 1),各类型区水位变化为 A(50 cm)>B(20 cm)>C(10 cm)>D(-10 cm)>E(-40 cm)>F(-60 cm),水位是影响水分条件的直接因素,进而影响植被特征。不同类型区植被特征见表 1。

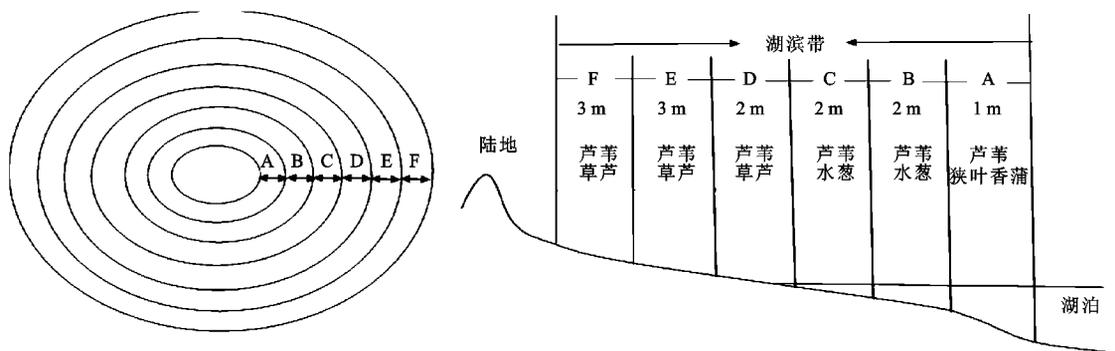


图 1 样点布设

表 1 不同类型区主要植被特征

类型区	植被类型	平均高度/cm	密度/(株·m ⁻²)	盖度/%	频度/%	生物量/(g·m ⁻²)
A	芦苇	181.46±4.78	219±28	68.89±4.23	81.11±2.61	1397.23±282.45
	狭叶香蒲	193.14±36.71	4±1	10.56±2.69	12.22±3.24	215.48±75.05
B	芦苇	127.73±7.87	196±16	54.44±3.77	76.67±2.36	1241.41±128.54
	水葱	50.42±14.80	40±14	22.22±5.96	31.11±8.07	156.49±52.47
C	芦苇	108.33±1.28	243±18	70.00±3.33	72.22±2.22	1337.74±200.71
	水葱	39.19±7.52	42±12	31.11±6.76	36.67±7.26	164.68±45.30
D	芦苇	163.33±1.18	114±15	53.33±3.33	74.44±5.80	704.85±94.72
	草芦	108.33±27.16	27±12	17.78±7.17	24.44±7.29	167.30±76.94
E	细灯心草	37.78±4.65	38±7	31.11±3.51	47.78±5.47	428.15±105.22
	芦苇	148.33±18.69	80±23	41.11±9.04	54.44±12.15	493.68±141.08
F	草芦	110.00±27.60	124±52	33.33±12.02	40.00±11.43	762.46±323.66
	细灯心草	15.00±6.67	32±23	16.67±7.45	26.67±11.06	263.54±133.77
F	芦苇	112.22±28.08	89±34	36.67±9.86	52.22±14.22	548.53±208.75
	草芦	149.44±18.74	79±25	55.56±8.84	51.11±9.78	488.19±154.19

注:表中数据为平均数±标准误差,n=9。

1.2 样品采集

采样时间为湖泊丰水期(2015年9月),在每个类型

区分别随机选取 9 个采样点,采集 0—40 cm 土壤,分为 0—10,10—20,20—40 cm 三层,共 162 个土壤样品。样

品封存于无菌塑料袋中,于 4 ℃ 冰箱保存。土壤样品自然风干后,研磨,过 1 mm 和 0.25 mm 筛。

1.3 分析方法

1.3.1 土壤理化性质 土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热容量法测定;全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;全磷含量采用 $\text{HClO}_4\text{—H}_2\text{SO}_4$ 法测定;土壤 pH 采用 pH 计测定(土水比为 1:2.5);土壤含水率采用烘干法测定;土壤容重采用环刀法测定;碳氮比、碳磷比、氮磷比采用物质的量比值计算;土壤粒径采用激光粒度分析仪测定。土壤粒径 $<0.002\text{ mm}$ 为黏粒, $0.02\sim 0.002\text{ mm}$ 为粉砂, $2\sim 0.02\text{ mm}$ 为砂粒,湿地土壤颗粒组成中 98% 以上为砂粒,土壤质地为砂土。

1.3.2 土壤碳储量计算方法 土壤剖面第 i 层的平均碳密度(C_i)和单位面积一定深度内(j 到 n 层)的碳储量(T_C)分别采用公式(1)和公式(2)计算^[12]:

$$C_i = D_i \times M_c \quad (1)$$

$$T_C = \sum_{i=j}^n C_i \times d_i \quad (2)$$

式中: C_i 为土壤碳密度(kg/m^3); T_C 为单位面积一定深度内的碳储量(t/km^2); D_i 为第 i 层土壤容重(g/cm^3); M_c 为相应土层的碳含量(g/kg); d_i 为第 i 层厚度(cm)。

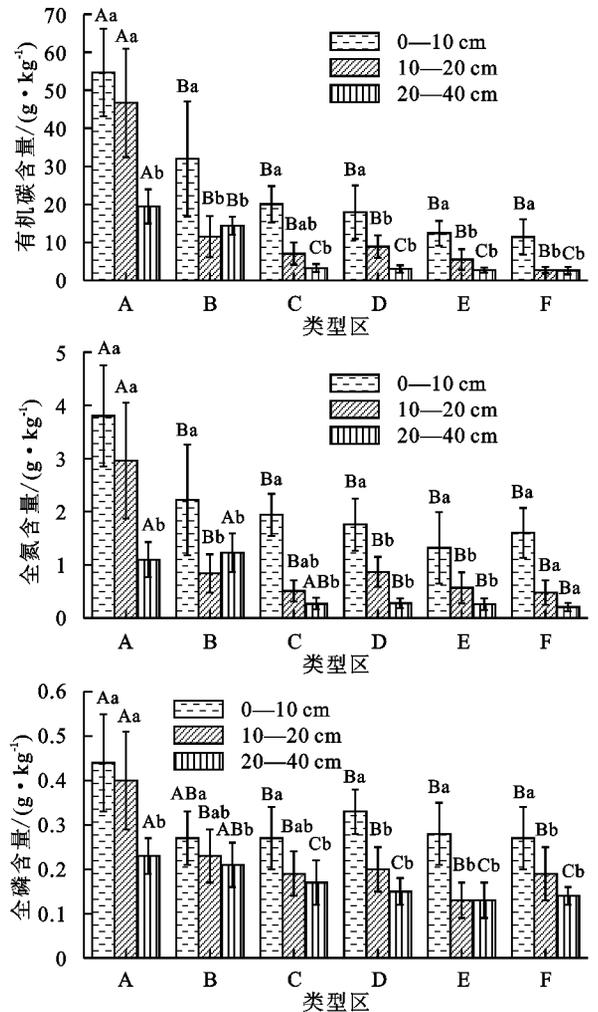
1.3.3 数据处理 采用 Spearman 方差分析($P < 0.01$)土壤 C、N、P 在各个类型区的差异性;Spearman 相关性分析沉积物有机碳、全氮、全磷含量分布特征及相关关系;统计分析采用 SPSS 13.0,图表绘制采用 Origin 2015。

2 结果与分析

2.1 不同类型区湖滨带沉积物有机碳、全氮、全磷含量及其相关性分析

不同类型区湖滨带沉积物 0—10 cm 有机碳、全氮、全磷含量变化分别为 4.57~70.35, 0.62~5.86, 0.14~0.63 g/kg, 平均值分别为 26.60, 2.13, 0.31 g/kg; 10—20 cm 有机碳、全氮、全磷含量变化分别为 1.67~63.70, 0.22~4.59, 0.10~0.54 g/kg, 平均值分别为 14.30, 1.12, 0.22 g/kg; 20—40 cm 有机碳、全氮、全磷含量变化分别为 1.52~24.74, 0.12~2.07, 0.07~0.31 g/kg, 平均值分别为 7.56, 0.60, 0.17 g/kg。不同类型区湖滨带沉积物有机碳、全氮含量表现为 $A > B > C > D > E > F$, 全磷含量表现为 $A > D > E > F > C > B$ (图 2); 在 0—20 cm 处, A 类型区有机碳、全氮、全磷含量与其他类型区差异显著($P < 0.05$); 在 20—40 cm 处, 主要表现为 A 和 B 类型区有机碳、全氮、全磷含量与其他类型区差异性显著($P < 0.05$)。在同一个类型区, 湖滨带沉积物有机碳、全氮、全磷含量垂直剖面分布具有一定层次性, 表现为 0—10 cm >

10—20 cm > 20—40 cm(图 2), A 类型区有机碳、全氮、全磷含量 0—20 cm 和 20—40 cm 间差异显著, 其他类型区 0—10 cm 和 20—40 cm 间差异显著。



注:图柱上方不同小写字母表示同一类型区不同土层差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示同一土层不同类型区差异显著($P < 0.05$)。下同图 5。

图 2 湖滨带沉积物不同类型区有机碳、全氮、全磷含量分布 湖滨带沉积物 3 种元素的相关性分析表明, 采样区湖滨带沉积物有机碳、全氮在各土层都存在极显著相关关系($n=54$)($P < 0.01$), 而全磷与有机碳、全氮之间在各土层相关性不显著($P > 0.05$)。有机碳与全氮呈良好的线性拟合关系(图 3), 其拟合程度在剖面上表现为 10—20 cm ($R^2 = 0.90$) > 0—10 cm ($R^2 = 0.84$) > 20—40 cm ($R^2 = 0.68$); 有机碳与全磷线性拟合程度均较低 ($R^2 < 0.58$); 全氮与全磷除 20—40 cm ($R^2 = 0.70$) 较高外, 其余土层也较低 ($R^2 < 0.53$)。从元素在空间尺度的变化趋势来看, 碳氮元素的变化几乎是同步的, 磷的变化滞后于碳和氮的变化(图 3)。

2.2 不同类型区湖滨带沉积物碳氮磷生态计量学特征

0—10 cm 湖滨带沉积物 C/N、C/P 和 N/P 分别为 2.24~22.00, 31.00~709.67, 4.07~56.79, 平均值为 13.70, 223.02, 15.85; 10—20 cm 湖滨带沉积物 C/N、C/P

P 和 N/P 分别为 2.98~24.45, 28.13~500.54, 1.71~80.82, 平均值为 14.30, 104.56, 12.58; 20—40 cm 湖滨带沉积物 C/N、C/P 和 N/P 分别为 1.18~29.12, 17.62~324.77, 0.29~45.97, 平均值为 14.74, 112.17, 7.84。3 种比值的变化趋势不同, C/N 表现为 A>D>C>B>E>F, C/P 表现为 A>B>C>D>E>F, N/P 表现为 F>A>B>C>E>D(图 4)。同一类型区沉积物垂直剖面上的 C/N 表现为 20—40 cm>10—20 cm>0—10 cm, C/P 和 N/P 表现为 0—10 cm>10—20 cm>20—40 cm(图 4)。统计分析表明, 在 0—20 cm 处, 沉积物 C/N 值在 A、B、C、D 类型区与 E、F 类型区差异显著($P<0.05$); 20—40 cm 处, A 类型区与其他类型区之间差异显著($P<0.05$), 其他类型区之间差异不显著($P>0.05$); C/P 在各个土层均表现为 A、B 与 C、D、E、F 存在显著差异($P<0.05$); N/P 在各个类型区差异不显著($P>0.05$)。

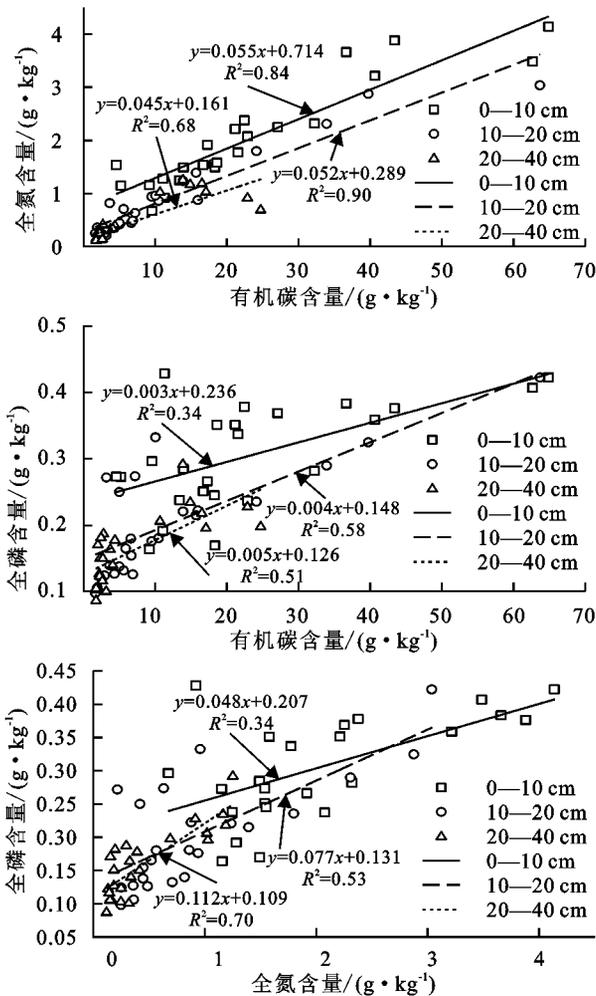


图 3 湖滨带湿地土壤碳氮磷的相关性

2.3 不同类型区湖滨带沉积物有机碳、全氮、全磷以及 C/N、C/P、N/P 的影响因素分析

表 2 为湖泊沉积物 0—40 cm 沉积物有机碳、全氮、全磷及环境因子的相关性分析。从表 2 可以看出, 土壤容重、土壤含水率是影响沉积物有机碳、全氮、全磷含量

的关键因子, 且与土壤容重呈极显著负相关($P<0.01$), 与土壤含水率呈极显著正相关($P<0.01$); 沉积物有机碳、全氮含量与土壤粉粒含量呈显著正相关($P<0.05$), 与土壤砂粒含量呈显著负相关($P<0.05$), 全磷含量与土壤粉粒和土壤砂粒含量相关性不显著; 沉积物有机碳、全氮、全磷含量与土壤黏粒相关性不显著。

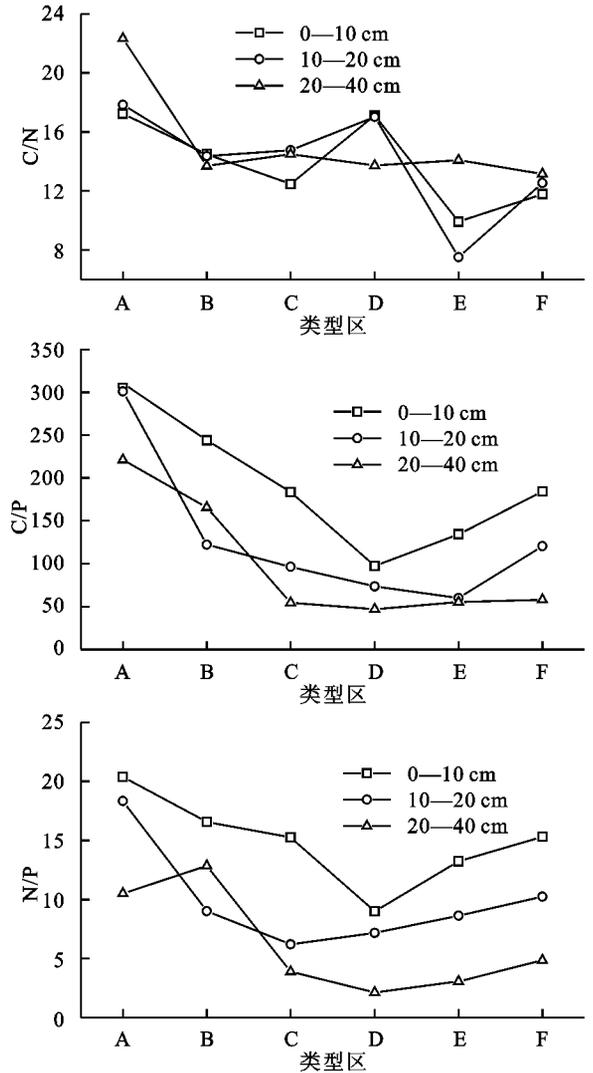


图 4 湖滨带沉积物不同类型区 C/N、C/P、N/P 的动态分布

表 3 为湖泊沉积物 0—40 cm 沉积物有机碳、全氮、全磷比值与环境因子的相关性分析。从表 3 可以看出, 沉积物中 C/P、N/P 与土壤容重呈极显著负相关($P<0.01$), 与含水率、有机碳、全氮、全磷呈极显著正相关($P<0.01$), C/P 与土壤粉粒呈显著正相关, 而 C/N 与它们均相关性不显著。可知土壤容重和土壤含水率是影响该区域湖滨带生态系统土壤 C/P、N/P 重要因子, C/N 与以上因子并无显著相关性。

2.4 不同类型区湖滨带沉积物土壤碳储量特征

A、B、C、D、E 和 F 类型区湖滨带沉积物 0—40 cm 土壤碳储量分别为 4 583.71, 3 014.17, 1 410.16, 1 488.88, 1 062.91, 831.25 t/km², 湖滨带沉积物 A 类型区显著高于其他类型区($P<0.05$), 其他类型区

之间差异不显著($P>0.05$)。A、B 类型区在 20—40 cm 明显高于 C、D、E、F 类型区($P<0.05$),其他土层差异不显著($P>0.05$)。A、B 类型区土壤碳储量在

20—40 cm 处达到最大值,C、D、E、F 类型区在 0—10 cm 处达到最大值(图 5),陆地生态系统土壤碳储量主要分布在表层土壤中。

表 2 沉积物有机碳、全氮、全磷及环境因子的相关性分析

项目	pH	土壤容重	土壤含水率	土壤黏粒	土壤粉粒	土壤砂粒	有机碳	全氮
有机碳	0.061	-0.900**	0.896**	0.139	0.569*	-0.505*	—	0.926**
全氮	0.077	-0.902**	0.822**	0.133	0.545*	-0.485*	0.926**	—
全磷	0.078	-0.897**	0.813**	0.067	0.459	-0.399	-0.140	-0.176

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; — 表示存在自相关关系,不宜进行相关分析。下同。

表 3 沉积物 C/N、C/P、N/P 与有机碳、全氮、全磷及环境因子的相关性分析

项目	pH	土壤容重	土壤含水率	有机碳	全氮	全磷	土壤黏粒	土壤粉粒	土壤砂粒
C/N	-0.214	0.128	0.122	—	—	-0.015	0.074	0.204	-0.186
C/P	-0.110	-0.890**	0.904**	—	0.944**	—	0.125	0.502*	-0.447
N/P	0.057	-0.700**	0.525*	0.590**	—	—	0.380	0.339	0.359

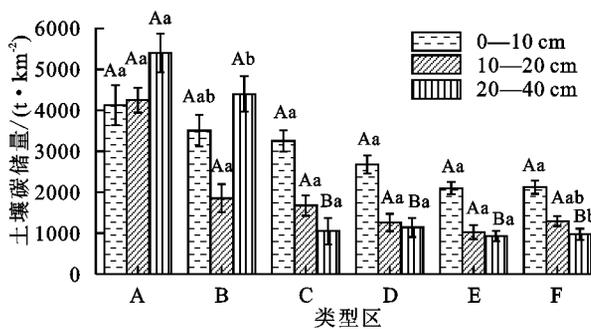


图 5 湖滨带沉积物不同类型区土壤碳储量分布

3 讨论

3.1 沉积物有机碳、全氮、全磷的空间异质性

本研究中,不同类型区湖滨带沉积物有机碳和全氮含量变化趋势一致,表现为 $A>B>C>D>E>F$ (图 2),相关性分析表明土壤含水率、容重是影响其变化趋势的主要因素(表 1),这是由于水分影响土壤的发育演化过程、植被生长类型和碳氮的沉积环境,从而影响土壤有机碳和全氮含量^[13-14],在本研究区不同类型区水分条件状况为 $A>B>C>D>E>F$ (图 1);有研究^[15]表明,土壤有机碳的增加能够改善土壤结构,导致土壤容重降低,因此土壤容重与有机碳和全氮含量之间呈显著负相关关系。同时湖滨带沉积物有机碳与全氮间存在极显著相关关系(表 1),即湖滨带沉积物有机碳与全氮来源相同^[16],该区域湖滨带沉积物全磷含量相对稳定,表现为 $A>D>E>F>C>B$,且变异程度小于有机碳和全氮,分析认为湖滨沉积物全磷含量来源主要是成土母质和动植物残体,而植物体含磷较低,返回土壤的磷对土壤影响较小^[17],因此湖泊沉积物中全磷含量在各类型区没有显著差异,主要影响因素可能是不同类型区的植物种类和数量。

在同一个类型区,湖滨带沉积物有机碳、全氮、全磷含量剖面分布具有一定层次性,表现为 $0-10\text{ cm}>10-20\text{ cm}>20-40\text{ cm}$ 。其中有机碳分布层次性差异性最显著,这主要是由于研究区 $0-10\text{ cm}$ 表层受植物

残体来源丰富,有机碳投入量较大^[18],而随着土层深度的增加,有机碳投入量相对减弱;氮元素的变化趋势基本与碳同步^[19],同时氮元素的增加可以促进有机碳的固定^[20]。

3.2 沉积物碳、氮、磷比的空间异质性

本研究中,3 个生态化学计量特征值在不同类型之间的大小关系并未表现出一致的规律(图 2),且 A 类型区湖泊沉积物 C/N 和 C/P 均高于其他类型区;在垂直剖面分布特征上,湖滨带沉积物 C/N 随着剖面变化呈现出 $20-40\text{ cm}>10-20\text{ cm}>0-10\text{ cm}$ 的规律,这是由于土壤 C/N 与微生物分解速度成反比关系,因为土壤微生物生长过程中,需同时消耗 C 和 N^[21],研究结果表明土层越深,其微生物越少,分解速度越小。湖泊沉积物 C/P 和 N/P 表现为随土层深度加深而减小,再一次验证湖泊沉积物 P 元素的变化相对较少,且与 C、N 来源不同^[22-23]。相关性分析表明,土壤含水率、容重是影响 C/P、N/P 变化趋势的主要因素(表 2),土壤含水率可以影响土壤养分的空间分布,充足的适宜土壤含水率有利于土壤有机质积累^[24],土壤容重小,土壤比较疏松,通透性好,肥力较高;反之,土壤体积质量大,表明土壤结构紧实,通透性较差,肥力较低^[25]。本研究区不同类型区水分条件状况为 $A>B>C>D>E>F$ (图 1),沉积物 C/P 和 N/P 随着含水率的降低表现为先降低后增高的趋势,这与郭子武等^[26]的研究结果不一致,可能是由于 E、F 类型区 N/P 和 C/P 不只是受到土壤含水率的影响,人类放牧活动对该区域沉积物的 N/P 和 C/P 也产生重要影响,也可能是由于在 E、F 类型区沉积物有机碳、全氮含量急剧下降,而全磷含量没有明显减少造成的。

3.3 碳与养分比对土壤碳储量的指示作用

本研究中,不同类型区湖滨带沉积物 $0-40\text{ cm}$ 土层 C/N 表现为 $A>D>B>C>E>F$,C/P 表现为 $A>B>D>E>C>F$,碳储量表现为 $A>B>D>C>E>F$,各类型区的碳与养分比均未表现出对土壤碳

储量良好的指示作用。王维奇等^[27]也得出了相似的结论,并提出土壤容重在调节二者之间关系的重要性,只有土壤容重相似,碳与养分比才会对土壤碳储量具有良好的指示作用。与此同时,本研究探讨了垂直土壤剖面各层碳与养分比与土壤碳储量的关系。总体来看,小尺度区域的碳与养分比对土壤碳储量具有良好的指示作用。

4 结论

本研究通过分析毛乌素沙地巴吓采当不同类型区湖滨带沉积物有机碳、全氮和全磷含量的分布特征、影响因素及生态化学计量学特征,得出主要结论为:

(1)不同类型区湖滨带沉积物有机碳和全氮含量变化趋势一致,其分布趋势表现为距离湖泊中心位置愈远,其含量愈低;在剖面分布上,具有明显的层次性,随土层加深而降低。与碳和氮的变化相比,湖滨带沉积物全磷的变化相对滞后,其水平分布特征与有机碳和全氮不同,而剖面分布相似。

(2)湖滨带沉积物有机碳与全氮来源相同,全磷来源与碳氮不同;土壤含水率和土壤容重是影响沉积物养分分布的关键因子。

(3)土壤含水率、容重是影响 C/P、N/P 变化趋势的主要因素。土壤容重相似,碳与养分比才会对土壤碳储量具有良好的指示作用。

参考文献:

[1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2010, 3(6): 540-550.

[2] Elser J J, Bracken M E, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.

[3] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2008, 39(39): 153-170.

[4] 高三平,李俊祥,徐明策,等. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征 [J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 947-952.

[5] Dj T J R. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534.

[6] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.

[7] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(13): 139-151.

[8] 叶春,李春华,吴蕾,等. 湖滨带生态退化及其与人类活

动的相互作用 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 401-407.

[9] 尹澄清. 内陆水—陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景 [J]. *生态学报*, 1995, 15(3): 331-335.

[10] 颜昌宙,金相灿,赵景柱,等. 湖滨带退化生态系统的恢复与重建 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 360-364.

[11] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式 [J]. *植物生态学报*, 1994, 18(1): 1-16.

[12] 王维奇,王纯,曾从盛,等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征 [J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4087-4093.

[13] 彭佩钦,张文菊,童成立,等. 洞庭湖典型湿地土壤碳、氮和微生物碳、氮及其垂直分布 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 49-53.

[14] 叶春,蒲玉琳,张世熔,等. 湿地退化条件下土壤碳氮磷储量与生态化学计量变化特征 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 181-187.

[15] 赵慧,刘伟龙,王小丹,等. 不同水分条件下藏北盐化沼泽湿地土壤碳氮的分布 [J]. *山地学报*, 2014, 32(4): 431-437.

[16] 李学刚,宋金明,李宁,等. 胶州湾沉积物中氮与磷的来源及其生物地球化学特征 [J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 84-93.

[17] 李晓东,魏龙,张永超,等. 土地利用方式对陇中黄土高原土壤理化性状的影响 [J]. *草业学报*, 2009, 18(4): 103-110.

[18] 张文菊,吴金水,肖和艾,等. 三江平原典型湿地剖面有机碳分布特征与积累现状 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 558-563.

[19] Wasserman J C, Hacon S, Wasserman M A. Biogeochemistry of mercury in the Amazonian environment [J]. *Ambio*, 2003, 32(5): 336.

[20] 谢文霞,朱鲲鹏,崔育倩,等. 胶州湾河口湿地土壤有机碳及氮含量空间分布特征研究 [J]. *草业学报*, 2014, 23(6): 54-60.

[21] 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 [J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.

[22] 仝川,贾瑞霞,王维奇,等. 闽江口潮汐盐沼湿地土壤碳氮磷的空间变化 [J]. *地理研究*, 2010, 29(7): 1203-1213.

[23] 卜晓燕,米文宝,许浩,等. 宁夏平原不同类型湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 42(1): 107-118.

[24] 刘景双. 湿地生物地球化学研究 [J]. *湿地科学*, 2005, 3(4): 302-309.

[25] 刘兴华. 黄河三角洲湿地植物与土壤 C、N、P 生态化学计量特征研究 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2013.

[26] 郭子武,陈双林,杨清平,等. 密度对四季竹叶片 C、N、P 化学计量和养分重吸收特征的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 893-899.

[27] 王维奇,仝川,贾瑞霞,等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 238-242.