

郭思淼,周晓雷,任菊,等.甘肃景泰白墩子盐沼国家湿地公园土壤生态化学计量特征[J].中国沙漠,2025,45(2):252-261.

甘肃景泰白墩子盐沼国家湿地公园 土壤生态化学计量特征

郭思淼,周晓雷,任菊,王润龙,樊玉科,刘锐,张晓玮

(甘肃农业大学 林学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:生态化学计量学是关于生态系统能量流动和养分循环动态的科学,是生态学的重要领域。以甘肃景泰白墩子盐沼国家湿地公园表层土壤(0~20 cm)为研究对象,依据8类典型植物群落的分布特征布设24组样点,采集土壤样品,分析土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)及全钾(TK)之间的相关性及其差异性,旨在揭示白墩子盐沼国家湿地公园土壤生态化学计量特征(SOC、TN、TP、TK、C/N、C/P、N/P、N/K)以及群落类型和土壤理化因子之间的关系,为白墩子盐沼国家湿地公园的科学管理和生态调控提供理论依据和数据支撑。结果表明:(1)研究区土壤SOC、TN、TP、TK的平均值分别为8.20、0.96、0.21、1.85 g·kg⁻¹;化学计量比C/N、C/P、N/P、N/K的均值分别为10.34、52.96、7.54、0.99;(2)各植物群落土壤之间生态化学计量特征均存在显著差异($P<0.05$),其中土壤SOC含量为怪柳(*Tamarix chinensis*)群落最大,芦苇(*Phragmites australis*)群落最小;土壤TN含量为盐角草(*Salicornia europaea*)群落最大,是碱蓬(*Suaeda glauca*)群落的2.03倍;土壤TP含量怪柳(*Tamarix chinensis*)群落最大,为盐角草(*Salicornia europaea*)群落的4.50倍;土壤TK含量怪柳群落最大,是小果白刺(*Nitraria sibirica*)群落的8.80倍;(3)研究区内土壤SOC、TN、TP含量极显著相关($P<0.01$);(4)冗余分析(RDA)表明土壤有效磷、pH及地上生物量是解释土壤生态化学计量特征变异的重要因子,三者对土壤生态化学计量特征的贡献率达68.10%。综上所述,研究区内土壤SOC、TN、TP、TK含量均低于中国沼泽湿地土壤平均水平,表明研究区域土壤中SOC、TN、TP、TK含量较为匮乏;各植物群落间土壤生态化学计量均存在显著差异,土壤有效磷、pH及地上生物量是影响白墩子盐沼国家湿地公园土壤生态化学计量特征的主要土壤理化因子;土壤N/P低于14,表明土壤TN含量是限制湿地公园灌丛生长的主要因素。

关键词:生态化学计量;土壤;盐沼湿地;理化性质

文章编号:1000-694X(2025)02-252-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00003

中图分类号:S714.8

文献标志码:A

0 引言

土壤生态化学计量学主要阐述土壤生态系统中化学元素的平衡、循环及其与生态系统功能之间的关系^[1]。化学元素碳(C)、氮(N)、磷(P)等是植物生长发育必需的营养物质,对土壤微生物数量、枯落物分解速率、土壤有机碳及营养物质的长期累积具有重要作用^[2-3]。土壤作为生态系统的重要组成部分,对植物的生长起着关键性作用,直接影响着植被群落的组成和结构^[4]。研究土壤营养元素的生态化学

计量学特性,揭示土壤营养元素间的耦合关系以及养分有效性,是理解生态系统碳、氮、磷循环和平衡机理的关键^[5-6]。土壤C/P值用来评价土壤微生物矿化过程中有机碳的释放和从环境中吸收和固定P的潜能,C/P值越低说明土壤中P的有效性越高^[7-8]。同时,还利用土壤N/P来预测土壤营养限制形态^[9]。土壤化学计量比能够直接反映土壤肥力状况,目前国内对土壤生态化学计量特征的研究多在于荒漠草地、草甸草原、森林、典型草原区退耕草地^[10-14],对盐沼湿地与植被相互关系涉及较少。

收稿日期:2024-10-16; 改回日期:2024-12-28

资助项目:国家专项资金甘肃景泰白墩子盐沼国家湿地公园生态监测项目(03723169)

作者简介:郭思淼(2000—),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为景观生态学。E-mail: 511945594@qq.com

通信作者:周晓雷(E-mail: zhoulx@gsau.edu.cn)

通过对盐沼湿地土壤养分含量和化学计量特征的研究,揭示土壤中C、N、P元素的平衡与限制性关系,达到调控土壤养分、结构和组成的目的,提高生态系统的稳定性,对盐沼湿地植物保护、土壤管理具有重要意义。

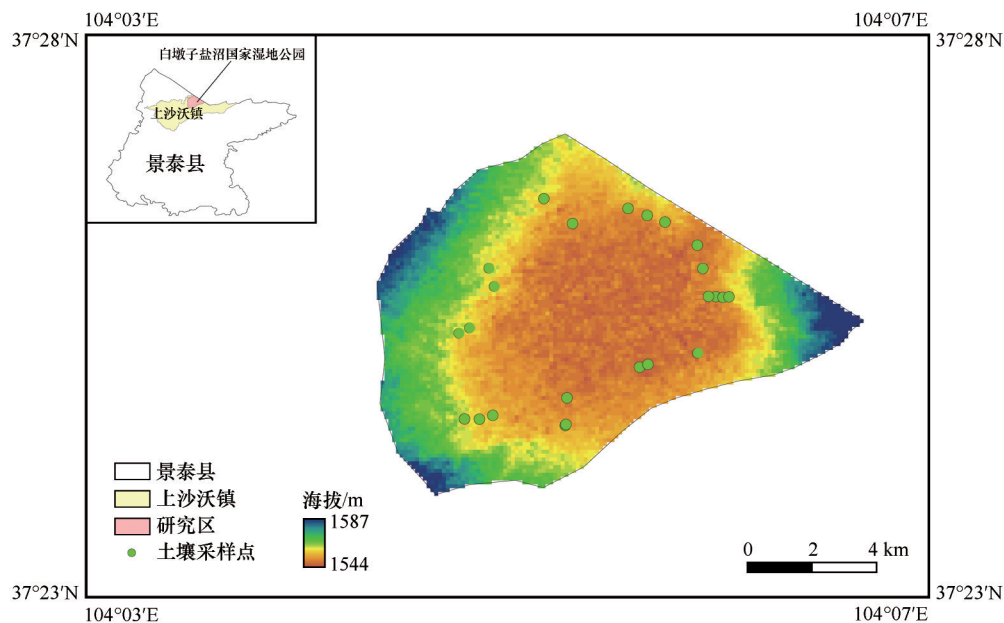
白墩子盐沼国家湿地公园为内陆盐沼湿地生态系统,地处腾格里沙漠与景泰绿洲的过渡地带,地表水资源主要来自天然降水汇流及景电工程灌溉回归水侧渗。此外,白墩子盐沼国家湿地公园生态系统结构较为完整,为人工盐沼湿地,在西北干旱荒漠区具有典型性和独特性。然而,当前对其生态系统的研究集中于植物群落特征,缺乏对土壤理化性质及其生态化学计量特征的系统分析。湿地内广泛分布的8类典型植物群落为芨芨草(*Neotrinia splendens*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、小果白刺(*Nitraria sibirica*)、芦苇(*Phragmites australis*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、盐角草(*Salicornia europaea*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、红砂(*Reaumuria songarica*)^[15]。通过分析土壤理化性质和生态化学计量比的差异性,探索两者之间的关系,旨在阐明盐沼湿地土壤生态化学计量特征及关键影响因素,解决盐

沼湿地植物在生长中受到的养分限制状况,以期为干旱荒漠区湿地的科学经营和管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白墩子盐沼国家湿地公园坐落于甘肃省景泰县北部上沙沃镇境内,地处白墩子盆地中部,紧邻腾格里沙漠的南缘,是景泰县内面积最大的季节性咸水沼泽,其南北长约12 km,东西达6 km(图1)。地理坐标37°23′59″—37°28′13″N, 104°03′28″—104°07′28″E。公园总面积为2 619.36 hm²,其中湿地面积为1 663.13 hm²,湿地占比为61.8%。研究区多年平均气温为8.5℃,多年平均降水量为185 mm,集中在7—9月,年蒸发量3 038 mm,为典型的大陆性气候特征。土壤以灌漠土、盐土和风沙土为主。植被类型主要有荒漠灌木、盐漠灌丛、盐沼灌丛、盐沼草本、沉水植被型。本研究选取分布面积较大的8类植物群落(小果白刺、芨芨草、盐爪爪、芦苇、盐角草、碱蓬、怪柳、红砂群落);其余分布面积较小的群落不做研究^[15]。



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2020)4619号)制作,底图边界无修改

图1 研究区位置和样点分布图

Fig.1 Location of the study area and distribution of sample points

1.2 野外调查

2022年和2023年植物生长季(8—9月),在各植物群落类型内布设面积为5 m×5 m的灌木样地,

在灌木样地中按“品”字形设置3个2 m×2 m草本样地,每个植物类群设置3个重复,共设置24个灌木样地和72个草本样地。

1.3 土壤样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集

土壤取样为表层土样,采样深度0~20 cm,在每个样方内采用5点交叉取样法采集表层土壤,将其混合均匀,每个样点采集样品1 kg左右,装入样品袋,带回实验室后经过风干、磨细、过筛、混匀、装瓶,以备相关指标的测定。

1.3.2 土壤理化性质测定

土壤有机碳(SOC)利用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮(TN)利用半微量凯氏法-凯氏定氮仪;全磷(TP)利用碱融-钼锑抗比色法;全钾(TK)利用原子吸收分光光度法^[16]。pH值测量使用pH计法;使用温度计测定土壤温度;速效钾、铵态氮的测定采用氯化钾溶液提取-分光光度法;有效磷利用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法^[5]。土壤含水量、容重、孔隙度均采用环刀法测定。

土壤容重=环刀内烘干土质量/环刀体积 (1)
式中:土壤质量单位为g,土壤体积单位为cm³。

孔隙度=(1-容重/密度)×100% (2)

含水量=(土壤鲜重-干重)/干重×100%^[16] (3)

1.3.3 变异系数

各类型植被群落土壤生态化学计量和土壤理化因子的空间变异性使用变异系数(CV)表示,变异系数的计算公式为:

$$CV = \frac{\text{标准差}}{\text{平均值}} \quad (4)$$

式中:当 $CV \leq 0.20$ 时表示弱变异性;当 $0.20 < CV < 0.50$ 时表示中变异性;而当 $CV \geq 0.50$ 时则表示强变异性^[16]。

1.4 数据处理与分析

运用SPSS 22.0软件进行群落间差异性的单因素方差分析(One-way ANOVA);运用Duncan法进行差异显著性检验($P=0.05$),采用Pearson相关分析法分析各元素之间的相关性,运用Origin 9.1软件进行相关图表绘制并对实验数据进行线性回归拟合分析;运用Canoco 5软件进行RDA分析,分析土壤理化因子对土壤生态化学计量特征的影响,使用ArcGIS软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 植物群落类型特征

白墩子盐沼国家湿地公园不同植物群落类型总

盖度为61.37%~86.16%,其中盐角草群落总盖度最大,盐爪爪群落最小;密度为16.33~767.41株·m⁻²,芨芨草群落最低,约为盐角草群落的2%;生物量为69.46~1 814.38 g·m⁻²,其中芦苇群落最大,是盐爪爪群落的26倍(表1)。

表1 白墩子盐沼国家湿地公园不同植物群落类型特征

Table 1 Community characteristics of different plant types in Baidunzi Salt Marsh National Wetland Park

群落类型	总盖度/%	密度/(株·m ⁻²)	地上生物量/(g·m ⁻²)
芨芨草	61.41±5.54 ^e	16.33±1.73 ^g	731.56±33.44 ^b
小果白刺	75.66±3.25 ^b	25.61±3.15 ^f	178.27±11.56 ^e
盐爪爪	61.37±5.12 ^e	137.26±19.86 ^e	69.46±6.63 ^h
碱蓬	81.72±6.91 ^d	415.65±23.51 ^b	131.28±15.20 ^g
盐角草	86.16±8.20 ^c	767.41±35.26 ^a	162.37±11.66 ^f
芦苇	70.65±4.31 ^a	156.40±12.81 ^c	1 814.38±120.56 ^a
怪柳	84.52±4.32 ^{bc}	209.52±19.72 ^d	261.77±28.25 ^d
红砂	79.33±3.73 ^a	22.28±2.34 ^{fg}	337.69±14.63 ^c

注:不同字母表示显著性差异($P<0.05$)。

2.2 土壤理化因子

白墩子盐沼国家湿地公园内8种植物群落类型理化性质存在差异(表2, $P<0.05$)。各群落之间土壤pH值、速效钾含量、铵态氮含量、有效磷含量、容重、含水量和孔隙度均呈显著差异($P<0.05$),各植物群落类型土壤均为碱性,其pH值为7.93~8.67;各植物群落类型中土壤速效钾含量101.14~371.23 mg·kg⁻¹,怪柳群落是盐角草群落的3.60倍;铵态氮含量为28.90~53.21 mg·kg⁻¹,最大为芦苇群落,最小为盐角草群落;有效磷含量为6.26~52.95 mg·kg⁻¹,最大值是最小值的8.50倍;容重为1.16~1.61 g·cm⁻³,盐爪爪群落约为碱蓬群落的72%;含水量是10.67%~21.67%,最大值是最小值的2倍;孔隙度为49.00%~55.67%。

8种植物群落类型的土壤pH值、容重和孔隙度均属于弱变异性;速效钾含量、铵态氮含量和含水量均属于中变异性;有效磷含量属于强变异性。

2.3 土壤生态化学计量特征

白墩子盐沼国家湿地公园8种植物群落类型土壤的SOC和TN含量分别是3.19~20.14 g·kg⁻¹和0.32~1.89 g·kg⁻¹,CV为0.40,均属于中等变异,均值分别为8.20、0.96 g·kg⁻¹;TP和TK含量分别是0.04~

表 2 白墩子盐沼国家湿地公园土壤理化因子的差异

Table 2 Differences of soil physical and chemical factors in Baidunzi Salt Marsh National Wetland Park

植物群落 类型	pH	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 /(mg·kg ⁻¹)	容重 /(g·cm ⁻³)	含水量 /%	孔隙度 /%
芨芨草	8.10±0.09 ^d	212.15±96.05 ^e	34.23±6.69 ^d	6.26±1.31 ^b	1.38±0.02 ^c	14.33±1.00 ^c	52.67±3.28 ^b
小果白刺	8.67±0.36 ^a	222.95±63.48 ^d	34.34±5.68 ^c	14.15±3.37 ^e	1.27±0.06 ^e	12.67±2.50 ^f	51.67±1.80 ^c
盐爪爪	7.93±0.18 ^d	268.66±24.68 ^b	32.38±2.18 ^e	52.95±5.97 ^a	1.16±0.06 ^f	13.00±1.73 ^e	55.67±1.80 ^a
碱蓬	8.13±0.05 ^c	172.40±16.76 ^g	29.50±2.33 ^g	11.97±1.39 ^g	1.61±0.02 ^a	21.67±2.18 ^a	49.67±1.32 ^c
盐角草	8.13±0.10 ^c	101.14±9.35 ^h	28.90±2.60 ^h	13.77±1.40 ^f	1.54±0.04 ^b	20.00±1.73 ^b	49.00±2.29 ^g
芦苇	8.57±0.30 ^b	263.02±126.82 ^c	53.21±8.15 ^a	20.25±3.94 ^d	1.54±0.06 ^b	11.67±0.50 ^g	50.67±1.32 ^d
怪柳	8.13±0.36 ^c	371.23±99.94 ^a	36.77±9.57 ^b	47.78±10.25 ^b	1.38±0.02 ^c	13.33±0.50 ^d	55.67±2.78 ^a
红砂	8.57±0.22 ^b	176.59±19.04 ^f	30.30±5.30 ^f	27.89±5.86 ^c	1.37±0.03 ^d	10.67±0.50 ^h	49.33±0.50 ^f
平均值	8.27	223.52	34.95	24.38	1.41	14.67	51.79
变异系数	0.04	0.45	0.27	0.70	0.10	0.27	0.06

注：不同字母表示显著性差异(P<0.05)。

0.87 g·kg⁻¹ 和 0.15~4.48 g·kg⁻¹, CV 分别为 0.68 和 0.70,均属于强变异性,均值分别为 0.21、1.85 g·kg⁻¹ (表 3)。土壤 C/N、C/P 和 N/P 的均值分别为 10.34、52.96 和 7.54,CV 分别为 0.69、0.68 和 1.10,均属于强变异性。土壤 N/K 的均值为 0.99,CV 为 1.15,属于强变异性(表 4)。

表 3 白墩子盐沼湿地公园土壤 C、N、P、K 含量(n=72)

Table 3 Soil C, N, P and K contents in Baidunzi Salt Marsh Wetland Park (n=72)

指标	最小值 /(g·kg ⁻¹)	最大值 /(g·kg ⁻¹)	平均值 /(g·kg ⁻¹)	变异系数 CV
SOC	3.19	20.14	8.20±3.31	0.40
TN	0.32	1.89	0.96±0.39	0.40
TP	0.04	0.87	0.21±0.14	0.68
TK	0.15	4.48	1.85±1.30	0.70

表 4 白墩子盐沼湿地公园土壤 C/N、C/P、N/P 和 N/K 值(n=72)

Table 4 Soil C/N、C/P、N/P 和 N/K in Baidunzi Salt Marsh Wetland Park (n=72)

指标	最小值	最大值	平均值	变异系数 CV
C/N	2.26	46.80	10.34±7.12	0.69
C/P	11.13	189.73	52.96±35.99	0.68
N/P	0.72	44.11	7.54±8.30	1.10
N/K	0.13	7.20	0.99±1.13	1.15

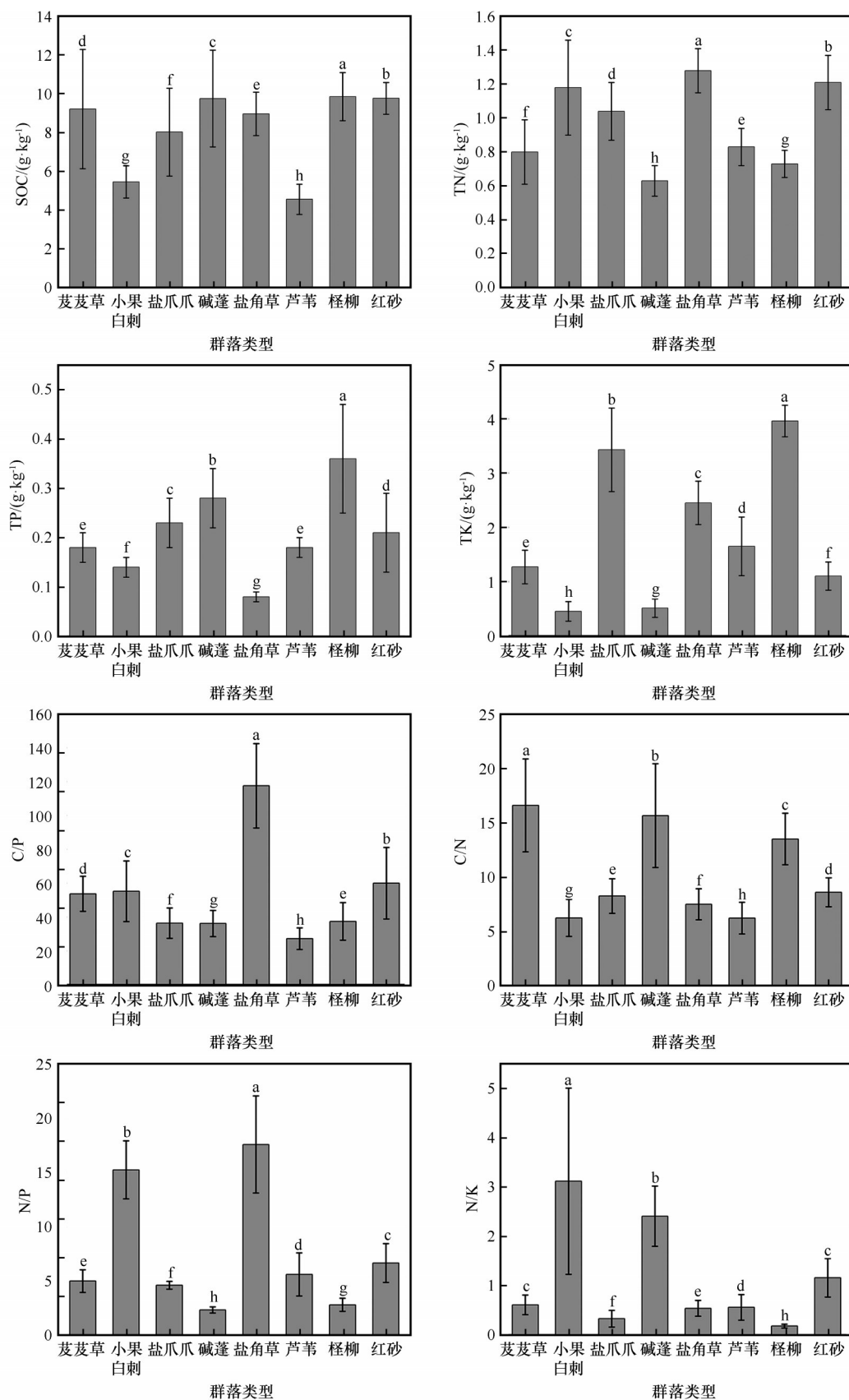
2.4 不同植物群落类型土壤生态化学计量比特征

白墩子盐沼国家湿地公园各群落土壤之间生

态化学计量均存在显著差异(图 2,P<0.05),其中土壤 TN 含量 0.63~1.28 g·kg⁻¹,盐角草群落最大,是碱蓬群落的 2.03 倍;土壤 TP 含量为 0.08~0.36 g·kg⁻¹,怪柳群落是盐角草群落的 4.50 倍;土壤 SOC 含量 4.56~9.86 g·kg⁻¹,芦苇群落仅为怪柳群落的 46.25%;土壤 TK 含量 0.45~3.96 g·kg⁻¹,怪柳群落为小果白刺群落的 8.80 倍。各群落土壤 C/N 为 6.24~16.61,芦苇群落仅为芨芨草群落的 37.57%;土壤 C/P 值为 27.24~117.54,盐角草群落为芦苇群落的 4.31 倍;土壤 N/P 值为 2.41~17.61,盐角草群落是碱蓬群落的 7.31 倍;土壤 N/K 值为 0.18~1.41,其中碱蓬群落最高,怪柳群落最低。

2.5 土壤生态化学计量特征与土壤理化性质的关系

Pearson 相关性分析表明,土壤 SOC 含量与土壤 TN、TP 含量,土壤 TN 与 TP 含量极显著相关(P<0.01)。土壤理化因子和土壤生态化学计量特征之间也存在一定的相关性(表 5)。其中,土壤 SOC 含量与有效磷含量显著正相关(P<0.05),与地上生物量显著负相关(P<0.05);土壤 TN 含量与有效磷含量、pH 显著正相关(P<0.05),与含水量显著负相关(P<0.05);土壤 TP 含量与有效磷含量显著正相关(P<0.05),与速效钾含量、含水量显著负相关(P<0.05);土壤 C/N 与铵态氮显著正相关(P<0.05);土壤 C/P 与土壤含水量极显著正相关(P<0.01),与速效钾含量、孔隙度极显著负相关(P<0.01),与地上生物量、铵态氮和有效磷含量显著负相关(P<0.05);土壤 N/P 与 pH 显著正相关(P<0.05)。



注:不同小写字母表示各类型植物群落之间元素差异性显著($P < 0.05$)

图2 不同植物群落土壤SOC、TN、TP、TK含量及其生态化学计量比的特征

Fig.2 Characteristics of soil SOC, TN, TP, TK contents and their ecological stoichiometry ratios in different phytoecommunities

表 5 土壤化学计量特征与土壤理化因子的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between soil stoichiometry characteristics and soil physicochemical factors

	SOC	TN	TP	TK	C/N	C/P	N/P	N/K
SOC	1	0.96**	0.84**	0.16	0.72**	0.56*	-0.11	-0.21
TN	—	1	0.85**	0.19	-0.65**	0.34**	0.69**	0.36**
TP	—	—	1	0.10	0.28*	-0.56**	-0.53**	-0.15
TK	—	—	—	1	-0.03	0.02	-0.10	-0.60**
地上生物量	-0.21*	-0.18	0.05	-0.14	-0.09	-0.26*	-0.13	-0.17
速效钾	0.02	-0.11	-0.26*	0.38**	-0.15	-0.46**	-0.3	-0.12
铵态氮	0.01	-0.08	-0.03	0.07	-0.25*	-0.29*	-0.11	-0.09
有效磷	0.27*	0.30*	0.26*	0.72**	-0.10	-0.25*	-0.20	-0.32**
pH	0.22	0.28*	-0.21	-0.42**	-0.16	0.11	0.25*	0.37**
含水量	-0.23	-0.29*	-0.26*	-0.12	0.22	0.36**	0.17	-0.01
容重	0.20	-0.21	-0.13	-0.27**	0.14	0.15	0.01	0.10
孔隙度	-0.19	-0.14	0.18	0.45**	-0.02	-0.31**	-0.19	-0.17

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

土壤理化因子和土壤生态化学计量的 RDA 排序(图 3)表明土壤生态化学计量及土壤理化因子在第 I 轴的 解释量为 65.10%，第 II 轴的解释量为 20.41%，两轴共解释 85.51%。由此表明该分析能够较好地反映土壤化学计量与土壤理化因子之间关系，且主要决定于第 I 轴。各土壤理化因子对土壤生态化学计量影响的重要性表现为：有效磷>pH>地上生物量>含水量>速效钾>容重>铵态氮>孔隙度，其

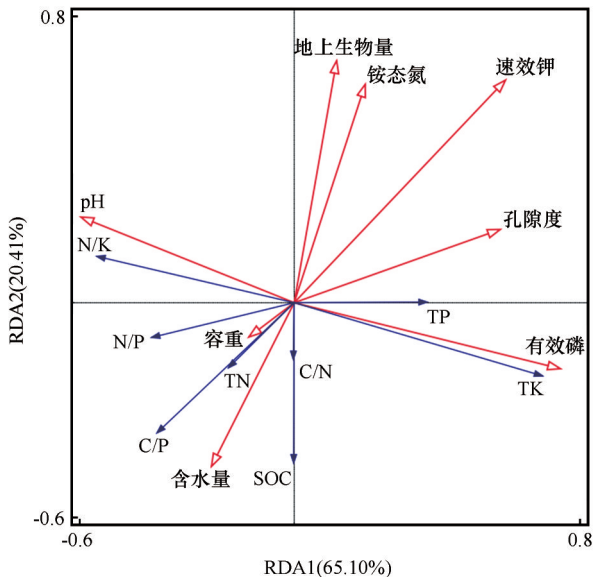
中有效磷、pH、地上生物量对土壤生态化学计量具有极显著影响($P<0.01$)，其对土壤生态化学计量的贡献率分别为 34.50%、18.60% 和 15.00%，分别解释了生态化学计量 29.40%、15.20% 和 14.50% 的变异。土壤含水量和速效钾对土壤生态化学计量具有显著影响($P<0.05$)，而其他土壤理化因子对土壤生态化学计量特征的影响均未达到显著水平(表 6)。

表 6 土壤理化因子对土壤生态化学计量重要性排序

Table 6 Ranking of the importance of soil physical and chemical factors in soil ecological stoichiometry

理化因子	解释率/%	贡献率/%	Pseudo- <i>F</i>	<i>P</i> 值
有效磷	29.40	34.50	7.80	0.01
pH	15.20	18.60	4.70	0.01
地上生物量	14.50	15.00	3.50	0.01
含水量	13.60	10.50	2.50	0.05
速效钾	12.50	9.70	2.50	0.05
容重	2.50	5.70	1.40	0.23
铵态氮	0.90	4.10	1.10	0.37
孔隙度	0.50	1.90	0.50	0.75

RDA 排序结果表明：土壤有效磷含量与土壤 SOC、TP、TK、C/N 正相关，与土壤 TN、C/P、N/P、N/K 负相关；土壤 pH 与土壤 TN、C/P、N/P、N/K 正相关，与土壤 SOC、TP、TK、C/N 负相关；地上生物量与土壤 TP 呈正相关，与土壤 SOC、TN、TK、C/N、C/P、



注：空心箭头表示土壤理化因子，实线箭头表示土壤生态化学计量

图 3 土壤生态化学计量与土壤理化因子 RDA 排序结果

Fig.3 Soil ecological stoichiometry and RDA ranking results of soil physicochemical factors

N/P、N/K 均为负相关关系。上述分析表明,土壤有效磷、pH 和地上生物量是影响白墩子盐沼湿地土壤生态化学计量特征的主要土壤理化因子(图 3)。

3 讨论

土壤中 SOC、TN、TP 和 TK 含量是反映土壤质量的关键指标,对植物的生长和养分循环等具有重要作用^[17]。不同植物群落类型、土壤类型、气候条件和人类活动对土壤化学计量特征的影响程度不同^[18-20]。本研究发现,甘肃景泰白墩子盐沼国家湿地公园土壤 SOC 含量平均值为 $8.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约为中国沼泽湿地土壤平均水平($11.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 73.21%, 与马飞等^[21]研究结果一致,这可能是枯落物的矿化分解与转化累积不平衡所导致的。不同植物群落类型的土壤养分含量差异明显,芦苇群落、小果白刺群落土壤 SOC 含量较低,这与王绍强等^[22]的研究结果一致,主要是因为上述植物叶片和枯落物的数量较少,生长的环境风沙大,植物枯落物的积聚能力较弱,从而减少了土壤中营养元素的积累。马飞等^[21]研究表明,中国荒漠与荒漠化地区,如准噶尔盆地、塔里木盆地、阿拉善高原、河西走廊和柴达木盆地等,表层土壤的 SOC 含量最低,这与本研究结果一致。

土壤中 N 的来源包括植物一系列的氮素矿化、固定、硝化和反硝化作用^[22-24]。本研究区内土壤 TN 含量的平均值为 $0.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为中国沼泽湿地平均水平($1.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 87.27%。本研究结果与廖金梅等^[25]的研究结果一致,中国荒漠区的土壤 TN 含量较低,全国范围内自然植被覆盖下的土壤 N 含量也相对较低,这可能是由于研究区域植被稀疏、枯落物积累较少以及土壤中有有机质匮乏^[26]。土壤 P 主要来源于土壤母质和有机物质,土壤和植被分布格局的异质性可以导致 P 的变异性增大,同时降水量和温度也是岩石分化和 P 淋溶的重要影响因子^[27]。本研究中土壤 TP 的平均值为 $0.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于中国沼泽湿地土壤平均水平($0.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 且研究区域内 TP 的变化范围较小,这与王凯等^[28]的研究结果一致,这可能是由于其元素经过矿化后沉积下来,不容易迁移。土壤 K 主要来源于土壤母质,本研究中土壤 TK 的平均值为 $1.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远低于中国沼泽湿地土壤平均值($14.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 这与李建平等^[29]的研究结果一致,这可能是由于土壤中有有机质与矿物态 K 之间存在“稀释效应”,即土壤有机质的增加导致

土壤 TK 含量的相对减少,同时张子琦等^[9]发现河西走廊地区土壤母质中 K 元素比较稀缺,这与本研究中 K 元素的变化相呼应。本研究区域土壤化学元素平均含量低于中国沼泽湿地土壤平均水平,表明研究区域 SOC、TN、TP、TK 含量较为匮乏。

土壤 C/N、C/P 以及 N/P 可以作为土壤养分的有效指标,当 C/N 较高时,有机质的矿化速度会减缓,这不利于有机氮的分解^[30-31]。本研究表明,白墩子盐沼国家湿地公园 C/N、C/P、N/P 的平均值分别为 10.34、52.96、7.54, 其中 C/N 和 N/P 低于中国沼泽湿地平均值(18.22、13.60), 土壤 C/N 均值低的原因可能是由于土壤 SOC 含量变化幅度较大, TN 含量的变化较小^[32]。白墩子盐沼国家湿地公园内 8 种典型植物群落的 C/N 比差异不显著且比较稳定,这说明 C、N 等结构元素在其累积和消耗中存在着相对稳定的比例,与其对环境的变化响应原理也是一致的^[33], 这一结果验证了 Chapin 等^[34]的研究结论。本研究中 C/P 值低于中国沼泽湿地平均值(245.22), 表明研究区内土壤磷的有效性较高^[35]。微生物分解有机质、释放养分有利于提高 P 的有效性。微生物分解有机质的速度受土壤 C/N 影响,当土壤 C/N 高于 25 时,有机质分解缓慢,需要 N 元素提高其生长率;而当土壤 C/N 低于 25 时,有机质分解速率较快,需要 C 元素提高其生长率^[22]。本研究区 C/N 的比值低于 25, 表明研究区有机质的分解速率较快,有利于提高 P 的有效性。生态化学计量学中,通常将 C/P 作为评价 P 有效性的重要指标,也是检验土壤 P 矿化能力的重要指标^[36]。土壤 N/P 比也可以作为确定养分的限制阈值和判断氮元素饱和的指标,当土壤 N/P 低于 14 时,土壤养分受 N 的限制;当土壤 N/P 高于 16 时, P 为土壤养分的限制元素^[37]。本研究中不同植物群落类型之间土壤 N/P 差异较小,土壤平均 N/P 为 7.54, 这表明研究区土壤 N 素含量较高,土壤主要受 N 限制,这与许尔文等^[38]的研究结果一致。本研究中盐角草群落的 C/P、N/P 比均远高于其他群落,这表明盐角草群落土壤 P 含量较低,同时 P 的有效性也较低^[35]。

王传盈等^[39]发现花园口黄河浮桥湿地土壤 SOC、TN、TP 和 TK 之间具有显著相关性,其中土壤 SOC 与 TN 的相关性极显著,本研究发现,土壤 SOC 与 TN、TP 极显著正相关($P < 0.01$), TN 与 TP 极显著正相关($P < 0.01$), 这与李培玺等^[40]的研究结果一致。相关性分析发现,土壤生态化学计量除了受到土壤

SOC、TN、TP的影响,还受到其他环境因子的影响。本研究中RDA结果显示,湿地公园内土壤有效磷、pH和地上生物量与土壤生态化学计量显著相关($P<0.01$),且三者对土壤生态化学计量特征的贡献率达到了68.10%,这表明土壤有效磷、pH和地上生物量是影响白墩子盐沼国家湿地公园土壤养分的重要理化因子。湿地土壤理化因子与生态化学计量特征密切相关^[41],本研究中土壤含水量和土壤C/P呈极显著相关,是由于土壤含水量高易于凋落物的分解,进而增加表层土壤养分的累积,这与徐静静^[42]的研究结果一致。土壤中的速效钾是植物生长不可或缺的元素,其供应状况对植物叶片的生长和发育具有重要影响。本研究中盐角草群落的速效钾含量最低,这是由于盐角草冠幅及植物根系较小^[43]。土壤有效磷的活化是复杂而缓慢的生物化学过程,受到植被类型、人为干扰、土壤微生物活动及理化特性、气候条件等多种因素的共同作用^[44]。本研究表明,植物群落类型对土壤有效磷含量的影响较为显著,盐爪爪群落的根系较为发达,土壤有机质含量较高从而导致有效磷含量较高,这与冼应男等^[45]的研究结果一致。土壤容重反映了土壤结构、透气性、透水性以及持水能力,并与有机质的含量相关^[41]。研究结果表明,碱蓬群落和盐角草群落的土壤容重显著高于其他群落,这是由于其土壤含水量高,生长茂盛,凋落物多,土壤有机质含量较高,因此土壤容重较大,这与纪文婧等^[46]研究结果一致。本研究中土壤的pH值变化差异不显著且均大于7,属于碱性土壤。有研究表明土壤pH偏高或偏低均会抑制土壤微生物的活动,从而导致土壤有机碳含量降低^[47]。本研究区域属于盐沼湿地且气温较高,凋落物的分解速度较快,导致土壤呈现出较高的pH值^[48]。

4 结论

研究区内土壤SOC、TN、TP、TK含量均低于中国沼泽湿地土壤平均水平,表明研究区域土壤SOC、TN、TP、TK含量较为匮乏;各群落之间生态化学计量均存在显著差异,土壤有效磷、pH、地上生物量是影响白墩子盐沼国家湿地公园土壤生态化学计量特征的主要土壤理化因子;土壤N/P显著低于14,表明土壤TN含量是限制湿地公园灌丛生长的主要影响因素。以上研究结果可为探究甘肃景泰

白墩子盐沼国家湿地公园土壤养分状况、供应和限制及其循环过程对不同类型植被群落响应机制提供重要理论依据。

参考文献:

- [1] Elser J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, et al. Organism size, life history, and N: P stoichiometry [J]. *Bioscience*, 1996, 46 (9): 674–684.
- [2] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [3] 陶冶, 刘耀斌, 吴甘霖, 等. 准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局[J]. *草业学报*, 2016, 25(7): 13–23.
- [4] 南富森, 李宗省, 张小平, 等. 黄河北岸兰州段丘陵区土壤生态化学计量与空间变异[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5): 167–176.
- [5] Zechmeister B S, Keiblinger K M, Mooshammer M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations [J]. *Ecological Monographs*, 2015, 85(2): 133–155.
- [6] 王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38 (18): 6580–6593.
- [7] Iost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province PR China [J]. *Geoderma*, 2007, 142(3/4): 245–250.
- [8] Schneider T, Keiblinger K M, Schmid E, et al. Who is who in litter decomposition? Metaproteomics reveals major microbial players and their biogeochemical functions [J]. *Isme Journal*, 2012, 6(9): 1749–1762.
- [9] 张子琦, 焦菊英, 陈同德, 等. 拉萨河流域洪积扇不同植被类型土壤化学计量特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(16): 6801–6815.
- [10] 向雪梅, 德科加, 林伟山, 等. 氮素添加对高寒草甸植物群落多样性和土壤生态化学计量特征的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(12): 2769–2777.
- [11] 陈小花, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛不同林分植物叶片-土壤生态化学计量特征[J]. *林业与环境科学*, 2021, 37(5): 102–108.
- [12] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377–385.
- [13] Shasha, Luo Q, Gao S, et al. Long-term fertilization and residue return affect soil stoichiometry characteristics and labile soil organic matter fractions [J]. *Pedosphere*, 2020, 30(5): 133–143.
- [14] Leal M C, Seehausen O, Matthews B. The ecology and evolution of stoichiometric phenotypes [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(2): 108–117.
- [15] 王彬. 2009–2014年景泰县沙化土地动态变化及防治对策研究[J]. *甘肃科技*, 2019, 35(4): 1–5.
- [16] 马剑, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山5种典型灌丛土壤生态化学计量特征[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(8): 1391–1400.

- [17] Sun J, Gao P, Li C, et al. Ecological stoichiometry characteristics of the leaf-litter-soil continuum of *Quercus acutissima* Carr. and *Pinus densiflora* Sieb. in Northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(1): 20.
- [18] 方培, 胡海波, 王霞, 等. 不同林龄麻栎人工林土壤生态化学计量特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(2): 39-47.
- [19] Yang Y, Luo Y. Carbon: nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development[J]. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(2): 354-361.
- [20] 李雨薇, 王博, 包玉海, 等. 草原风蚀坑发育对土壤生态化学计量的影响[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 166-175.
- [21] 马飞, 徐婷婷, 刘吉利, 等. 不同种源中间锦鸡儿碳氮磷化学计量特征研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(7): 1381-1389.
- [22] 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.
- [23] 谢锦, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4363-4372.
- [24] 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 等. 河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3353-3363.
- [25] 廖金梅, 黄维, 李安生, 等. 氮素对茶树生长及茶园土壤环境的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(16): 82-87.
- [26] 杭伟, 陆永兴, 郭浩, 等. 西北荒漠区土壤氮素组分沿干旱梯度的空间变化[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 259-268.
- [27] Yu M F, Tao Y, Liu W, et al. C, N, and P stoichiometry and their interaction with different plant communities and soils in subtropical riparian wetlands[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(3): 1024-1034.
- [28] 王凯, 齐悦彤, 刘建华, 等. 油松与榆树人工林植物-凋落叶-土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2022, 41(3): 427-434.
- [29] 李建平, 张昊. 黄土高原封育草地深层土壤碳氮动态[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2021.
- [30] 刘姝莹, 安慧, 张馨文, 等. 氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2724-2734.
- [31] 郑浩浩, 易文利, 田苗, 等. 毛乌素沙地南缘不同植被类型生态化学计量特征[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2022, 42(1): 74-79.
- [32] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [33] 温晨, 杨智姣, 杨磊, 等. 半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1824-1834.
- [34] Chapin F S III, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology[M]. New York, USA: Springer, 2002.
- [35] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870-879.
- [36] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2239-2248.
- [37] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [38] 许尔文, 牛赞, 赵维俊, 等. 祁连山北麓青海云杉林天然更新对土壤理化性质的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(7): 90-100.
- [39] 王传盈, 王凯月, 王浩然, 等. 黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1674-1683.
- [40] 李培玺, 储炳银, 滕臻, 等. 巢湖湖滨带不同植被类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 草业科学, 2020, 37(8): 1448-1457.
- [41] 庞金凤, 张波, 王波, 等. 昆仑山中段北坡不同海拔梯度下土壤生态化学计量学特征[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 178-185.
- [42] 徐静静. 巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地土壤微生物群落结构及酶活性特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
- [43] 高维常, 袁玉波, 潘首慧, 等. 贵州烟田不同土壤类型pH和速效钾含量分布特征[J]. 中国农学通报, 2023, 39(10): 88-94.
- [44] 李苏青, 管冬兴, 李希媛, 等. 天津滨海湿地土壤有机碳和有效磷的盐度响应及影响因素[J]. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1381-1389.
- [45] 冼应男, 陈婵, 方晰, 等. 湘中丘陵区4种植被类型土壤全磷、有效磷含量的变异特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 79-88.
- [46] 纪文婧, 程小琴, 韩海荣, 等. 山西太岳山好地方典型植被类型土壤理化特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 141-148.
- [47] Wang X G, Lü X T, Zhang H Y, et al. Changes in soil C: N: P stoichiometry along an aridity gradient in drylands of northern China[J]. Geoderma, 2020, 361: 114087.
- [48] 陈志洲, 符兰吟, 陈亚芹, 等. 盐城沿海滩涂湿地不同植物群落对土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(19): 69-71.

Ecological stoichiometric characteristics of soil in Baidunzi Salt Marsh National Wetland Park, Jingtai, Gansu Province

Guo Simiao, Zhou Xiaolei, Ren Ju, Wang Runlong, Fan Yuke, Liu Rui, Zhang Xiaowei

(Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Ecological stoichiometry is an important means of studying the dynamics of energy flow and nutrient cycling in ecosystems, and is also one of the important fields of ecological research. This study focuses on the surface soil (0–20 cm) of Baidunzi Salt Marsh National Wetland Park in Jingtai, Gansu Province. Based on the distribution characteristics of 8 typical plant communities, 24 sample points were set up to collect soil samples and analyze the differences and correlations between the stoichiometric characteristics of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK). The aim is to reveal the soil ecological stoichiometry characteristics (SOC, TN, TP, TK, C/N, C/P, N/P, N/K) of Baidunzi Salt Marsh National Wetland Park and their relationship with community types and soil physicochemical factors, in order to provide theoretical basis and data support for the scientific management and ecological regulation of Baidunzi Salt Marsh National Wetland Park. The results showed that: (1) the average values of soil SOC, TN, TP, and TK in the study area were 8.20, 0.96, 0.21, 1.85 g·kg⁻¹, respectively; The mean values of stoichiometric ratios C/N, C/P, N/P, and N/K are 10.34, 52.96, 7.54, and 0.99, respectively; (2) There were significant differences ($P<0.05$) in the ecological stoichiometry of soil among different plant communities, with soil SOC content being highest in the *Tamarix chinensis* community and lowest in the *Phragmites australis* community; The soil TN content is the highest in the *Salicornia europaea* community, which is twice that of the *Suaeda glauca* community; The soil TP content in the *Tamarix chinensis* community is the highest, which is 4.50 times that of the *Salicornia europaea* community; The soil TK content in the *Tamarix chinensis* community is the highest, 8.8 times that of the *Nitraria sibirica* community; (3) There is a highly significant correlation ($P<0.01$) between soil SOC, TN, and TP content in the study area; (4) Redundancy analysis (RDA) shows that soil available phosphorus, pH, and aboveground biomass are important factors in explaining the variation of soil ecological stoichiometry characteristics, with a contribution rate of 68.1% to soil ecological stoichiometry characteristics. In summary, the soil SOC, TN, TP, and TK contents in the study area are lower than the average level of Chinese swamp wetland soil, indicating that the soil SOC, TN, TP, and TK contents in the study area are relatively scarce; There are significant differences in soil ecological stoichiometry among different plant communities, and soil available phosphorus, pH, and aboveground biomass are the main soil physicochemical factors affecting the soil ecological stoichiometry characteristics of Baidunzi Salt Marsh National Wetland Park; The soil N/P ratio was significantly lower than 14, indicating that soil TN content is the main factor limiting the growth of shrubs in wetland parks.

Key words: ecological stoichiometry; soil; salt marsh wetlands; physicochemical properties