DOI: 10.5846/stxb201905201041
刘冬,张剑,包雅兰,赵海燕,陈涛.水分对敦煌阳关湿地芦苇叶片与土壤 C、N、P 生态化学计量特征的影响.生态学报,2020,40(11):3804-3812.
Liu D, Zhang J, Bao Y L, Zhao H Y, Chen T. Effects of soil moisture on *Phragmites australis* leaves and soil C, N and P ecological stoichiometric characteristics in Yangguanwetland, Dunhuang. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3804-3812.

水分对敦煌阳关湿地芦苇叶片与土壤 C、N、P 生态化学计量特征的影响

刘 冬,张 剑*,包雅兰,赵海燕,陈 涛
西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要:土壤水分是影响干旱区植物养分吸收和利用策略的关键因子之一。研究不同水分梯度叶片与土壤生态化学计量特征,有助于揭示植物对环境变化的响应特征及生态适应性。通过野外调查与实验分析,对敦煌阳关不同水分梯度芦苇叶片与土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量特征及其关系进行了研究。结果表明:(1)随土壤含水率升高,叶片 C、N、P 含量降低,叶片 C/N、C/P、N/P 升高。(2)随土壤含水率升高,土壤有机碳(OC)、总氮(TN)、总磷(TP)含量及土壤 N/P 升高,土壤 C/N 降低,土壤 C/P 先升后降。(3)低水分梯度叶片 N、C/N 与土壤 N、C/N 显著负相关($P<0.05$),叶片 C、P、C/P、N/P 与土壤 C、P、C/P、N/P 无显著相关性($P>0.05$);高、中水分梯度叶片 C、N、P 与土壤 C、N、P 化学计量特征相关性均不显著($P>0.05$)。低水分梯度叶片受干旱胁迫和土壤养分制约,且能够保持较高的叶养分含量,体现了干旱区湿地植物异质生境下独特的养分调节机制。

关键词:生态化学计量学;水分梯度;敦煌阳关;芦苇叶片

Effects of soil moisture on *Phragmites australis* leaves and soil C, N and P ecological stoichiometric characteristics in Yangguanwetland, Dunhuang

LIU Dong, ZHANG Jian*, BAO Yalan, ZHAO Haiyan, CHEN Tao
College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, *China*

Abstract: Soil moisture is one of the key factors affecting the strategies of plant nutrient uptake and utilization in arid region. Studies on leaf and soil ecological stoichiometry characteristics under different soil moisture gradients are helpful to reveal the response and ecological adaptability of plants to environmental changes. Through field investigation and experimental analysis, reed leaves and soil C, N, P ecological stoichiometric characteristics under different soil moisture gradients and their relationships in the Yangguan wetland of Dunhuang were studied. The results showed that: (1) with the increase of soil moisture content, the contents of leaf C, N and P showed a decreasing trend, while leaf C/N, C/P, and N/P showed the opposite trend; (2) with the increase of soil moisture content, the content of soil organic carbon (OC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and N/P increased, soil C/N ratio decreased and soil C/P first increased and then decreased; (3) under the low soil moisture gradient, N and C/N of leaves were significantly negative correlated with soil N and C/N ($P<0.05$), and leaf C, P, C/P, N/P had no significant correlation with soil C, P, C/P, and N/P ($P>0.05$). There was no significant correlation between the soil and leaf stoichiometric characteristics under the high and medium soil moisture gradients ($P>0.05$). Leaves under low soil moisture gradient, which were restricted by drought stress and soil nutrients, could maintain higher leaf nutrient content, reflecting the unique nutrient regulation mechanism of wetland plants under heterogeneous habitats in arid areas.

基金项目:国家自然科学基金项目(41461012);甘肃省自然科学基金项目(1208RJAZ114)
收稿日期:2019-05-20; **网络出版日期**:2020-04-02
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianzhang@nwnu.edu.cn

Key Words: ecological stoichiometric; moisture gradient; Dunhuang Yangguan; reed leaf

在陆地生态系统中,营养元素相互作用过程中的平衡关系被称为生态化学计量学[1],生态化学计量学为研究碳(C)、氮(N)、磷(P)等多种元素在生态过程中的循环与耦合关系提供了一种重要的方法[2]。C 是构成植物体内干物质的最主要元素,而 N 和 P 是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素[3],它们是地球生命化学的基础,也是连接生物体与自然资源的重要纽带[4]。植物通过根系从土壤中吸收生长发育所需的养分,叶片通过光合作用同化和积累 C,又通过凋落物将所吸收养分反馈给土壤[5]。这是一个复杂的养分循环过程,不仅受植物自身生长型、生理特征和生活史等影响,而且受生长环境、群落组成及土壤理化因子等多方面影响。因此研究植物与土壤营养元素特征,对于揭示植物在不同生境下生长策略以及养分循环方式具有重要意义。

C、N、P 化学计量比格局及其驱动因素一直是生态化学计量学的一个重要研究领域[6]。近 30 年来国内外学者对生态化学计量学的研究,不仅涉及到了生物学科的不同层次(分子、细胞、有机体、种群、生态系统)[6],而且还发展到了不同时空尺度(全球[7]、欧洲[8]、北美[9]、中国[10]、中国东部南北样带[11])。也不再聚焦于生态系统的某一个组分,而是综合考虑整个生态系统[12]。国内外学者对不同生态系统植物叶片-土壤生态化学计量学特征开展了大量研究。如俞月凤等[13]对喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征进行研究得出土壤 C、N、P 供应量对乔木叶片 C、N、P 含量影响不大,Yang 等[1]对华北沙化地区不同植物群落间叶、根、凋落物和土壤的生态化学计量进行研究得出 C:N:P 化学计量可能引起土壤特性的变化,章广琦等[14]通过对黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征进行研究得出不同层次植物与土壤养分特征间具有不同的关系,而对湿地生态系统植物与土壤生态化学计量特征及其相互作用的研究未受到较高的关注,尤其是对环境变化较为敏感的干旱区湿地。

干旱区湿地是江河源区重要的水源涵养地,在调节气候和遏制区域土地荒漠化方面有着不可替代的作用[15]。在干旱区,植物生长不仅受土壤养分限制,还受水分短缺限制。植物叶片容易受到生物与非生物因素的影响,对土壤水分有效性做出响应[16],随着干旱程度的加剧,叶氮、叶磷会维持在较高水平[17]。为此,本研究以土壤含水率为梯度,研究干旱区湿地芦苇(*Phragmites australis*)叶片与土壤的生态化学计量特征及其关系,试图明晰:(1)不同水分梯度下的芦苇叶片和土壤 C、N、P 生态化学计量特征的差异性;(2)不同水分梯度下芦苇叶片与土壤 C、N、P 生态化学计量特征的关联性。以期为干旱区湿地资源的合理利用以及生态恢复提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

敦煌阳关湿地,位于距敦煌市 70 km 的敦煌阳关国家自然保护区东南 4 km 的黄水坝水库(渥洼池)一带(94°06′—94°09′E,39°51′—39°55′N)(图 1),总面积 11.06 km^2,是中国西部荒漠区中较为罕见的特殊成因湿地生态系统。南与阿克塞哈萨克族自治县相邻,北与新疆维吾尔自治区接壤,西接库姆塔格沙漠。区内地势平坦,海拔高度在 1150—1500 m 之间,全年平均气温 9.3℃,年均降雨量为 36.9 mm,相对湿度 43%,气候干燥少雨,夏季酷热,冬季寒冷,属于典型大陆性干旱气候,具有干旱区湿地生态系统到荒漠生态系统过渡的典型特征。区内有多处泉眼,量大且常年溢出,为湿地生态系统提供稳定补给水。主要土壤类型为沼泽土、草甸土和盐渍土,部分区域分布有风沙土和棕漠土。芦苇(*Phragmites australis*)是研究区内的优势物种,伴生种有赖草(*Leymus secalinus*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、水麦冬(*Triglochin palustre*)、盐角草(*Salicornia europaea*)、鸦葱(*Scorzonera austriaca*)、海乳草(*Glaux maritima*)等。

1.2　样地设置与采样

在 2015 年对研究区全面调查的基础上[15],2016 年 8 月,根据代表性和典型性原则,通过聚类分析将 18 个样地分为低水分 W1(n=6)、中水分 W2(n=5)、高水分 W3(n=7)三个梯度(高、中和低水分梯度土壤含

水率分别为 32.72%、22.27%和 7.30%),在每个水分梯度上设置了 5—7 个 30 m×30 m 的样地,在每个样地内随机设置三个 1 m×1 m 的样方,共计 54 个样方。

在每个样方内根据芦苇根系生长状况,按 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 四个深度,沿样方对角线,分层钻取土样,去除杂质后放置在通风处阴干,研钵研磨后过 0.25 mm 和 0.15 mm 筛,密封低温保存;在每个样方内,采集相对完整的芦苇叶片若干带回实验室,在 65℃条件下烘干至恒重,采用混合球磨仪(MM400,Retsch,Germany)磨碎后过 0.15 mm 筛,密封低温保存。

1.3 样品测定

采用电导法测定土壤盐分,采用烘干法测定土壤含水率,采用酸度计测定土壤 pH,采用环刀法测定土壤容重;采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定土壤有机碳(OC)和芦苇叶片 C 含量;采用开氏法测定土壤全氮(TN)和芦苇叶片 N 含量;采用钼锑抗比色法测定土壤全磷(TP)和叶片 P 含量[18]。

1.4 数据处理

利用 SPSS 22.0(SPSS Inc. Chicago,USA)软件进行统计分析,用单因素方差分析检验不同水分梯度叶片和土壤 C、N、P 以及土壤理化性质的差异性,用 Pearson 相关分析方法分析叶片与土壤生态化学计量学之间的关系。

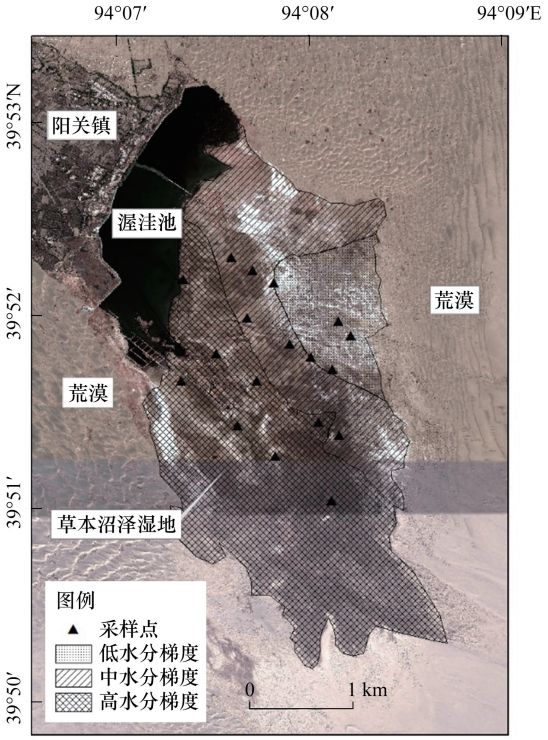

图 1 研究区地理位置及样地分布示意图

Fig.1 The distribution map of observation sites

2 结果与分析

2.1 不同水分梯度芦苇叶片生态化学计量学特征

如图 2 所示,叶片 C、N、P 含量随土壤含水率的升高而降低。其中叶片 C 含量变化范围为 365.36—442.43 mg/g,均值为 408.52 mg/g,高水分梯度叶片 C 含量显著低于中、低水分梯度($P<0.05$);叶片 N 含量变化范围为 15.26—25.62 mg/g,均值为 19.54 mg/g,不同水分梯度之间无显著差异($P>0.05$);叶片 P 含量变化范围为 0.50—1.65 mg/g,均值为 1.03 mg/g,低水分梯度叶片 P 含量显著高于高、中水分梯度($P<0.05$)。

叶片 C/N、C/P、N/P 随土壤含水率的升高而升高。C/N、C/P、N/P 对应的均值分别为 21.27、415.68 和 19.77,变化范围分别为 20.84—21.70、344.21—455.81 和 16.76—21.60。高、中水分梯度叶片 C/P、N/P 显著高于低水分梯度($P<0.05$),而叶片 C/N 不同水分梯度间差异不显著($P>0.05$)。

2.2 不同水分梯度土壤生态化学计量学特征

如图 3 所示,土壤 OC、TN、TP 含量随土壤含水率的升高而升高。土壤 OC 含量变化范围为 7.3—8.8 mg/g,均值为 8.3 mg/g;土壤 TN 含量变化范围为 0.41—0.78 mg/g,均值为 0.58 mg/g,其中高水分梯度土壤 TN 含量显著高于中、低水分梯度($P<0.05$);土壤 TP 含量变化范围为 0.40—0.45 mg/g,均值为 0.42 mg/g。

土壤 C/N、C/P、N/P 的变化范围分别为 10.4—19.0、16.4—22.9 和 0.95—1.45,均值分别为 14.0、19.6 和 1.3。高水分梯度土壤 N/P 显著高于低水分梯度($P<0.05$),高水分梯度土壤 C/N 显著低于中、低水分梯度($P<0.05$)。

2.3 不同水分梯度土壤理化性质

由表 1 可知,从高水分梯度到低水分梯度,土壤水分显著下降了 28.55%和 72.89%;而土壤盐分显著上升了 83.46%和 59.54%。中水分梯度土壤 pH 显著高于高、低水分梯度,不同水分梯度土壤容重无显著差异。

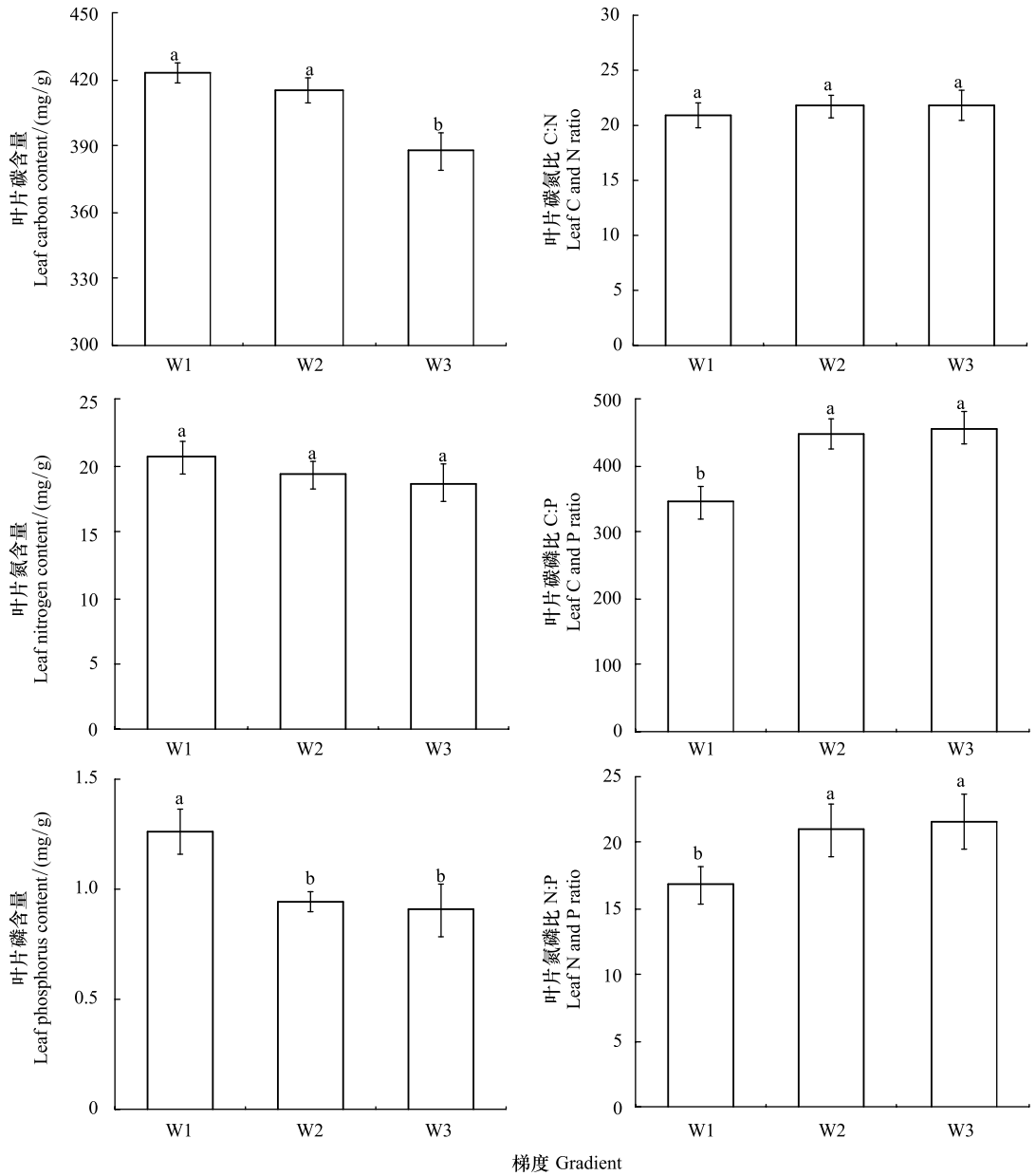

图 2　不同水分梯度下芦苇叶片 C、N、P 化学计量特征(平均值±标准误差)

Fig.2　Stoichiometric characteristics of C, N and P of reed leaves under different water gradients (mean±SE)

W1:低水分梯度,Low moisture gradient;W2:中水分梯度,Medium moisture gradient;W3:高水分梯度,High moisture gradient;a、b、c 表示不同水分梯度之间有显著差异(P<0.05)

表 1　不同水分梯度土壤理化性质表

Table 1　Physical and chemical properties of soil with different water gradients

梯度 Gradient	水分 Moisture/%	盐分 Salinity/(mg/g)	pH	容重 Bulk density/(g/cm^3)
W1	8.82±2.03a	15.25±1.52a	8.23±0.04a	1.48±0.02a
W2	23.25±3.27b	6.17±1.41b	8.68±0.08b	1.5±0.03a
W3	32.54±0.92c	1.02±0.13c	8.39±0.08a	1.37±0.08a

W1:低水分梯度,Low moisture gradient;W2:中水分梯度,Medium moisture gradient;W3:高水分梯度,High moisture gradient;数据为平均值±标准误差,同列不同小写字母表示样地间差异显著(P<0.05)

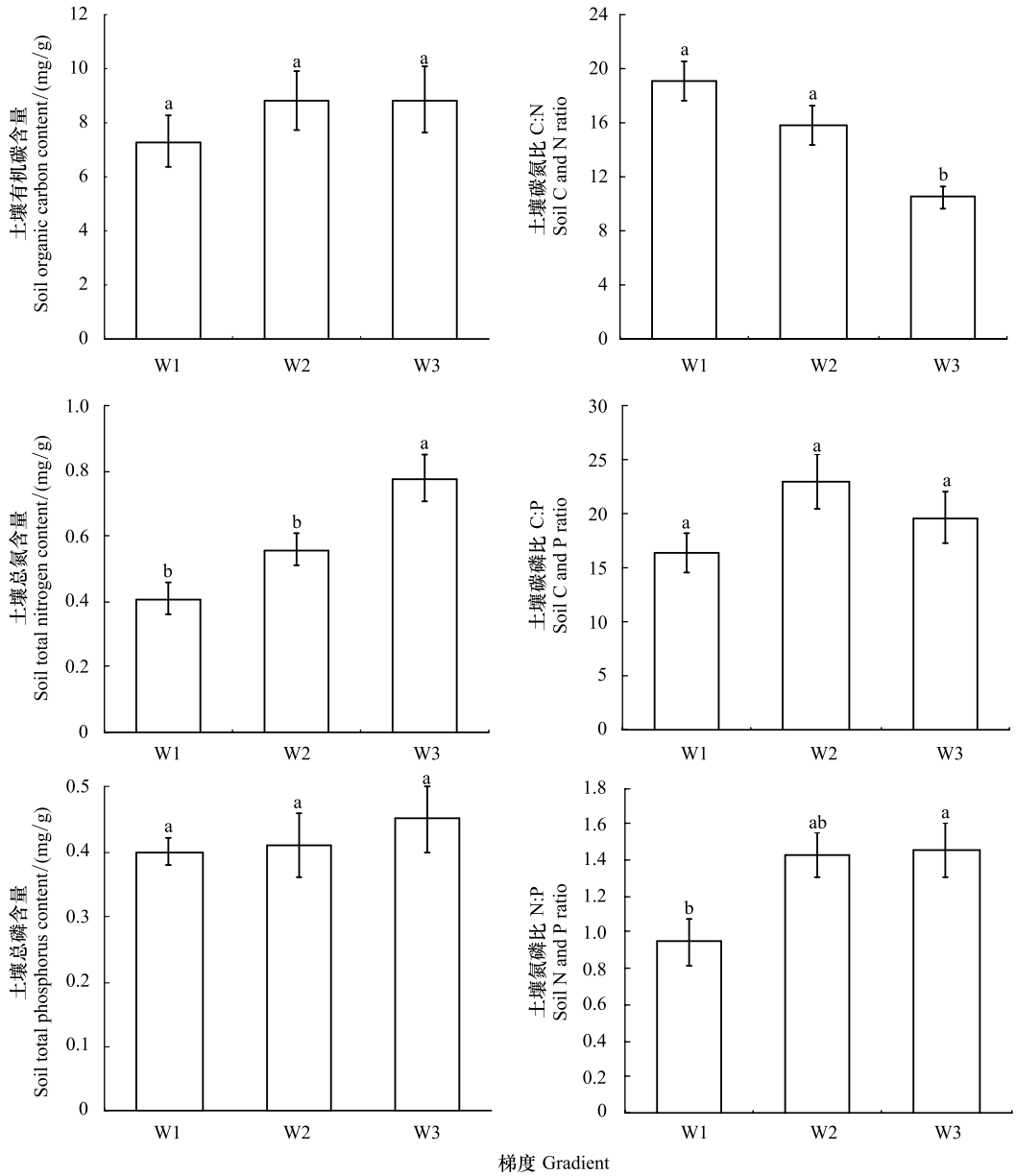

图 3 不同水分梯度下土壤 C、N、P 化学计量特征(平均值±标准误差)

Fig.3 Stoichiometric characteristics of soil C, N and P under different water gradients (mean±SE)

2.4 不同水分梯度芦苇叶片和土壤化学计量学关系

由表 2 可知,高、中水分梯度芦苇叶片与土壤 C、N、P 化学计量特征无显著相关性($P>0.05$)。在低水分梯度,土壤 TN 含量与叶片 C、N 含量显著负相关($P<0.05$),与叶片 C/N 显著正相关;土壤 TP 含量与叶片 C/P 显著正相关($P<0.05$);土壤 C/N 与叶片 C 含量显著正相关($P<0.05$),与叶片 N 含量极显著正相关($P<0.01$),与芦苇叶片 C/N 显著负相关;土壤 N/P 与叶片 C、N 含量显著负相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同水分梯度芦苇叶片 C、N、P 生态化学计量特征

高、中、低三个水分梯度叶片 C、N、P 平均含量(408.52、19.54 mg/g 和 1.03 mg/g)低于全球陆生植物叶片 C、N、P 平均水平(464、20.1 mg/g 和 1.99 mg/g)[7,19]、中国陆生植物叶片 N、P 平均水平(20.24 mg/g 和

1.21 mg/g)[10],主要因为研究区位于西北干旱区,土壤贫瘠,盐碱化程度较高,导致叶片所获取的有效养分较少,这与罗艳等[20]和牛得草等[21]对塔里木河上游、阿拉善地区荒漠植物的研究结果一致。叶片 C、N、P 含量随着土壤含水率的降低而升高,受土壤水分限制,仅低水分梯度表现出了较高的叶养分浓度,说明叶片对干旱的响应策略不同[22]。高、中水分梯度受干旱影响程度相对较弱,能够凭借自身的渗透能力进行调节,而低水分梯度叶片在重度干旱条件下对干旱胁迫做出了响应。有研究表明干旱胁迫机制不仅会影响叶片 C 向淀粉转化,还能够使叶片中蛋白质和游离氨基酸升高维持细胞渗透平衡[23],所以在干旱条件下叶片会保持较高的 C、N、P 浓度,这也是植物在异质生境下的选择性适应策略。

表 2　不同水分梯度芦苇叶片和土壤 C、N、P 化学计量特征的相关性

Table 2　Correlation relationship between C, N, P stoichiometric characteristics of reed leaves and soil in different water gradients

水分梯度 Moisture gradient	叶片 Leaf	土壤 Soil					
		SOC	TN	TP	SOC/TN	SOC/TP	TN/TP
W1	C	−0.048	−0.378*	−0.031	0.393*	−0.07	−0.367*
	N	−0.031	−0.418*	−0.228	0.443**	0.02	−0.340*
	P	−0.11	−0.076	−0.32	−0.002	−0.021	0.002
	C/N	0.017	0.347*	0.256	−0.381*	−0.05	0.261
	C/P	0.111	0.003	0.392*	0.058	−0.007	−0.093
	N/P	0.077	−0.221	0.171	0.279	0.018	−0.248
W2	C	0.168	0.104	0.051	0.292	0.11	0.14
	N	0.099	0.093	0.086	0.174	−0.007	0.08
	P	0.023	−0.08	−0.008	0.059	0.057	−0.104
	C/N	−0.066	−0.098	−0.093	−0.11	0.044	−0.064
	C/P	0.034	0.104	0.026	0.042	−0.017	0.133
	N/P	0.057	0.095	0.058	0.092	−0.026	0.1
W3	C	−0.147	−0.053	−0.03	−0.154	−0.075	−0.051
	N	−0.054	−0.01	0.027	−0.11	−0.05	−0.052
	P	−0.126	−0.028	−0.214	−0.097	0.066	0.186
	C/N	0.023	0.007	−0.042	0.064	0.038	0.051
	C/P	0.094	0.028	0.197	0.062	−0.072	−0.158
	N/P	0.077	0.023	0.221	0.015	−0.097	−0.192

* *:$P<0.01$;*:$P<0.05$;C:碳;N:氮;P 磷;SOC:土壤有机碳;TN:全氮;TP:全磷

叶片 C/N、C/P 是衡量植物养分利用效率的重要指标[24]。叶片平均 C/N 为 21.27,变化范围在 20.84—21.69,接近全球(22.5)[7]和黄土高原植物平均水平(21.2)[25]。叶片平均 C/P 为 415.68,变化范围为 344—455,远高于全球和黄土高原平均水平(232 和 312)[7,25]。该结果与 Aerts 和 Chapin III[26]的研究结果一致,植物维持较高的叶片 C/N、C/P 有助于提高在干旱和营养不良环境中的竞争力。C 作为结构性元素,其变异性较小,影响 C/N、C/P 值的主要因素是 N 和 P[21],较高的 C/N、C/P 值代表植物 N、P 利用效率较高[27],相较于全球和黄土高原,本研究区 P 利用效率较高,这与研究区植物生长受限元素有较大的关系。Koerselman 和 Meuleman[8]认为可以用 N/P 阈值指示植物生长受 N 限制还是 P 限制,当 N/P>16 时,植物受 P 限制,当 14<N/P<16,受 N、P 共同限制,当 N/P<14 时受 N 限制。叶片平均 N/P 为 19.8,三个梯度 N/P 值均大于 16,因此可以推断本研究区受 P 限制,这与张剑等[28]对该地区的研究结果一致。根据 Han 等[29]的研究,中国陆地植物生长主要受 P 限制,研究区有较高的 P 利用效率,这也符合植物在缺乏营养元素供应的情况下具有较高的养分利用率的结论[30]。

叶片 C/N、C/P 随着土壤含水率的升高而升高,说明高水分梯度芦苇在具有资源利用优势的条件下,与土壤达到了较高的平衡状态,叶片也具有较高的养分利用效率[13]。高水分梯度叶片 C/P、N/P 显著高于低水分梯度($P<0.05$),而 C/N 不同梯度间无显著差异($P>0.05$),这是因为植物中 C/N 相较于 C/P、N/P 具有更好的

稳定性。Yang 等[31]的研究表明,C 与 N 之间的相互作用不依赖于生态系统的类型,因为 N 主要以有机 N 的形式存在于土壤和植物中。

3.2 不同水分梯度土壤 C、N、P 生态化学计量特征

土壤化学计量特征作为判断土壤有机质和质量的重要指标,可以指示和预测养分在土壤中的循环和变化趋势[6]。本研究土壤 C、N、P 平均含量(8.3、0.58 mg/g 和 0.42 mg/g)远低于全国平均水平(11.12、1.06 mg/g 和 0.65 mg/g)[20],可见研究区土壤总体养分含量较低。土壤中的营养元素尤其是 C、N 主要来源于土壤有机质和凋落物分解[20],芦苇作为研究区的单一优势种,生物量虽大,但因研究区干旱少雨,土壤盐渍化严重影响较难分解,凋落物反馈土壤受阻,影响土壤中有机质积累,因此土壤中 C、N 含量较低;P 是一种沉积性元素,通常被认为是淡水湿地系统中最有限的养分,受成土条件和气候影响[2],研究区内的沙质土不利于 P 的积累,因此 P 含量较低。

土壤 C、N 和 P 随着土壤含水率的升高而升高,土壤含水率对土壤 N 的转化和有效性有积极的影响,并且土壤微生物在缺氧条件下活性较差,减缓了有机质的分解和氮的浸出,所以高水分梯度土壤 C、N 含量较高;系统的 P 输入主要依赖于生物过程、岩石风化和淋滤以及沉积矿物中 P 的赋存,相对较少依赖于土壤中的迁移[2],相比低水分梯度,高水分梯度土壤长期受水淹影响有利于 P 的储存,土壤 P 含量相对较高。

研究表明,土壤 C/N 与其有机质分解速度呈负相关[13],本研究中土壤 C/N 平均值(14.0)高于全球[32]及我国[20]土壤 C/N 平均水平(13.3 和 12.0),说明研究区土壤有机质分解速率相对缓慢。不同水分梯度土壤 C/N 表现为高水分梯度<中水分梯度<低水分梯度,且高水分梯度土壤 C/N 显著低于中、低水分梯度($P<0.05$),反映了不同梯度内土壤有机质分解速度有差异,中、低水分梯度有机质分解速度较慢,主要是因为中、低水分梯度高盐碱、低水分的土壤环境抑制土壤中微生物群落活性(如表 1),减缓了有机物的矿化分解[33]。土壤 C 和 N 随土壤含水率的升高而升高,而 C/N 呈相反趋势,可以看出研究区土壤中 C 和 N 的积累并不是同步的。此外,有机质分解特征与土壤 C/N 变化趋势相反,与 N/P 变化一致,这与王维奇等[34]对闽江河口湿地的研究结果一致。土壤 C/P 可以用来表示 P 有效性高低[13],不同水分梯度土壤 C/P 表现为中水分梯度>高水分梯度>低水分梯度,在一定程度上中水分梯度土壤 P 有效性可能要高于高、低水分梯度。土壤平均 N/P(1.3)低于全球[32]及全国[20]平均水平(5.6 和 2.15),这表明 N 对土壤的制约作用要大一些,因为相对于 P 植物更倾向于保留 N,特别是当土壤的 N/P 较低时[35]。Drenovsky 和 Richards[36]认为植物生长受到特定元素的限制原因是植物对特定元素的吸收率较低,而不是土壤缺乏该元素。植物与土壤作为生态系统的两大组成部分,它们的限制元素存在着较大的差异,这可能与它们不同的氮磷循环机制有关[2],这也是研究区叶片与土壤限制元素不同的原因。土壤 N/P 可以作为养分制约类型的有效预测指标[35],高水分梯度土壤 N/P 显著高于低水分梯度($P<0.05$),说明本研究区内不同水分梯度土壤之间可能产生了不同养分限制类型,一个限制性影响因素可能会改变整个生态系统的功能[37],因此有必要进行进一步研究(如氮磷添加的控制实验[38])来确定土壤或植物中的限制性因素。

3.3 不同水分梯度芦苇叶片与土壤 C、N、P 生态化学计量学的相关性

植物生态化学计量特征更倾向于是一种物种性状,与物种自身以及对环境的适应性有关[20]。在低水分梯度,叶片 N、C/N 和土壤 N、C/N 表现为显著负相关($P<0.05$),这是因为土壤含水率较低时,土壤表层泥炭、草木残体及凋落物易氧化分解[39],导致大量养分损失,土壤亏损元素得不到补给而表现为负相关。叶片 C、P、C/P、N/P 和土壤 C、P、C/P、N/P 无显著相关性,叶片 C 主要来源于大气,而与土壤 C 无显著相关性;有研究表明,植物叶片 P 含量和土壤 P 含量密切相关,土壤中 P 浓度的增加往往导致植物 P 浓度的增加[2],这与本研究中结果不一致,这可能是低水分梯度土壤 P 有效性较低,叶片对 P 的利用率较低。低水分梯度叶片 C、N、P 养分浓度高于高、中水分梯度,而对土壤中 C、N、P 养分利用率较低,一方面可能与植物对养分的吸收利用及再分配有关,另一方面可能是低水分梯度土壤含水率较低,植物与土壤间的养分循环较弱而引起的[14]。

本研究中仅低水分梯度叶片 N、C/N 和土壤 N、C/N 显著负相关,高、中水分梯度叶片与土壤 C、N、P 化学

计量特征相关性均不显著($P>0.05$),这与塔里木河上游地区[20]及古尔班通古特沙漠地区[40]的结果一致,与呼伦贝尔沙地、毛乌素沙地[41]和黄土丘陵沟壑区[30]的结果不一致,说明在干旱或半干旱地区植物与土壤养分循环不仅受土壤水分影响,还受地形因子和植物种类的影响。崇明湖滩涂湿地[42]植物叶片与土壤 C、N、P 化学计量特征有显著相关性,而松嫩平原[43]及云南干热河谷地区[24]植物叶片与土壤 C、N、P 化学计量特征相关性不显著,这说明干旱地区和湿润地区叶片与土壤 C、N、P 化学计量特征相关性随生态系统类型和研究尺度的不同而不同。

植物体的营养元素主要来源于土壤,但是土壤中的养分却不一定是影响植物养分含量的主要因素。本研究选取对环境变化敏感的叶片来反映植物与土壤的密切关系,对于凋落物及土壤特性的研究较少,而凋落物是植物反馈土壤的重要环节,因此有必要结合凋落物及土壤特性进一步研究不同水分梯度植物与土壤的生态化学计量特征。

4　结论

通过对不同水分梯度芦苇叶片与土壤 C、N、P 生态化学计量特征及其关系对比分析,发现研究区芦苇叶片和土壤养分整体偏低,土壤受 N 元素制约,而植物受 P 元素限制;与低水分梯度相比,高、中水分梯度土壤有效养分较高,植物与土壤达到较高的平衡状态,受土壤影响较小;而低水分梯度叶片受干旱胁迫和土壤养分制约,与土壤相关关系较为显著,并且能够保持较高的养分含量,体现了干旱区湿地植物独特的适应机制。

参考文献(References):

[1] Yang Y, Liu B R, An S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China. Catena, 2018, 166: 328-338.

[2] Jiang Y F, Guo X. Stoichiometric patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland of the Poyang Lake region in Southern China. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(10): 3476-3488.

[3] Hu Y F, Shu X Y, He J, Zhang Y L, Xiao H H, Tang X Y, Gu Y F, Lan T, Xia J G, Ling J, Chen G D, Wang C Q, Deng L J, Yuan S. Storage of C, N, and P affected by afforestation with *Salix cupularis* in an alpine semiarid desert ecosystem. Land Degradation & Development, 2018, 29(1): 188-198.

[4] 赵耀, 王百田, 李萌, 王旭虎, 董秀群. 晋西吕梁山区 3 种森林碳氮磷生态化学计量特征. 应用与环境生物学报, 2018, 24(3): 518-524.

[5] 李明军, 喻理飞, 杜明凤, 黄宗胜, 石建华. 不同林龄杉木人工林植物-凋落叶-土壤 C、N、P 化学计量特征及互作关系. 生态学报, 2018, 38(21): 7772-7781.

[6] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.

[7] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.

[8] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.

[9] Bedford B L, Walbridge M R, Aldous A. Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate north American wetlands. Ecology, 1999, 80(7): 2151-2169.

[10] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[11] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.

[12] 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 付姗, 胡启武. 鄱阳湖湿地优势植物叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. 生态学报, 2016, 36(7): 1898-1906.

[13] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.

[14] 章广琦, 张萍, 陈云明, 彭守璋, 曹扬. 黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(4): 1328-1336.

[15] 张剑, 王利平, 谢建平, 赵庭伟, 曹建军. 敦煌阳关湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2455-2464.

[16] 黄菊莹, 袁志友, 李凌浩. 羊草绿叶氮、磷浓度和比叶面积沿氮、磷和水分梯度的变化. 植物生态学报, 2009, 33(3): 442-448.

[17] 胡梦瑶, 张林, 罗天祥, 沈维. 西藏紫花针茅叶功能性状沿降水梯度的变化. 植物生态学报, 2012, 36(2): 136-143.
[18] 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.
[19] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciencesof the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
[20] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 安申群. 塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(24): 8326-8335.
[21] 牛得草, 李茜, 江世高, 常佩静, 傅华. 阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C:N:P 化学计量比的季节变化. 植物生态学报, 2013, 37(4): 317-325.
[22] 张剑, 包雅兰, 宿力, 王利平, 陆静雯, 曹建军. 敦煌阳关湿地芦苇叶性状对土壤水分的响应研究. 生态学报, 2019, doi: 10.5846/stxb201808231796.
[23] 张建新, 葛淑芳, 吴玉环, 杨云峰, 徐根娣, 刘鹏. 干旱胁迫对紫金牛叶片碳氮代谢的影响. 水土保持学报, 2015, 29(2): 278-282.
[24] Lin Y M, Chen A M, Yan S W, Rafay L, Du K, Wang D J, Ge Y G, Li J. Available soil nutrients and water content affect leaf nutrient concentrations and stoichiometry at different ages of *Leucaenaleucocephala* forests in dry-hot valley. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2): 511-521.
[25] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化. 生态学报, 2011, 31(17): 4985-4991.
[26] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. Advances in Ecological Research, 1999, 30: 1-67.
[27] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. The American Naturalist, 1982, 119(4): 553-572.
[28] 张剑, 宿力, 王利平, 包雅兰, 陆静雯, 高雪莉, 陈涛, 曹建军. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响研究——以敦煌阳关湿地为例. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589.
[29] Han W X, Fang J Y, Reich P B, Ian Woodward F, Wang Z H. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China. Ecology Letters, 2011, 14(8): 788-796.
[30] 赵一娉, 曹扬, 陈云明, 彭守璋. 黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(16): 5451-5460.
[31] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, Ji J C, Ma W H. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands. Biogeosci Discuss, 2010, 7: 1-24.
[32] Post W M, Pastor J, Zinke P J, Stanggenberger A G. Global patterns of soil nitrogen storage. Nature, 1985, 317(6038): 613-616.
[33] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400-408.
[34] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 仝川. 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. 生态学报, 2012, 32(13): 4087-4093.
[35] Wang W Q, Sardans J, Wang C, Zeng S C, Tong C, Asensio D, PeñuelasJ. Ecological stoichiometry of C, N, and P of invasive *Phragmites australis* and native*Cyperusmalaccensis* species in the Minjiang River tidal estuarine wetlands of China. Plant Ecology, 2015, 216(6): 809-822.
[36] Drenovsky R E, Richards J H. Low leaf N and P resorption contributes to nutrient limitation in two desert shrubs. Plant Ecology, 2006, 183(2): 305-314.
[37] Bell C, Carrillo Y, Boot CM, Rocca D J, Pendall E, Wallenstein M D. Rhizosphere stoichiometry: are C:N:P ratios of plants, soils, and enzymes conserved at the plant species-level? New Phytologist, 2014, 201(2): 505-517.
[38] Yan Z B, Tian D, Han W X, Tang Z Y, Fang J Y. An assessment on the uncertainty of the nitrogen to phosphorus ratio as a threshold for nutrient limitation in plants. Annals of Botany, 2017, 120(6): 937-942.
[39] 王元峰, 王辉, 马维伟, 冯宜明, 李俊臻. 尕海 4 种湿地类型土壤水分特性研究. 干旱区研究, 2012, 29(4): 598-603.
[40] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征. 应用生态学报, 2015, 26(3): 659-665.
[41] 任悦, 高广磊, 丁国栋, 张英, 郭米山, 曹红雨, 苏敏. 沙地樟子松人工林叶片-枯落物-土壤氮磷化学计量特征. 应用生态学报, 2019, 30(3): 743-750.
[42] 韩华, 王昊彬, 余华光, 谭渝峰, 由文辉. 崇明滩涂湿地不同盐度梯度下芦苇种群及土壤的生态化学计量学特征. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 816-823.
[43] 丁凡, 廉培勇, 曾德慧. 松嫩平原草甸三种植物叶片 N、P 化学计量特征及其与土壤 N、P 浓度的关系. 生态学杂志, 2011, 30(1): 77-81.