



引用格式: 淑敏, 青云, 敖敦格日乐, 等. 水氮添加对文冠果幼苗 C、N、P 和 K 分配模式及化学计量特征的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(11): 1769-1779. [SHU M, QING Y, Aodungerile, et al. Effects of water and nitrogen additions on the allocation pattern and stoichiometric characteristics of C, N, P, and K in *Xanthoceras sorbifolia* seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(11): 1769-1779.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240112

水氮添加对文冠果幼苗 C、N、P 和 K 分配模式及化学计量特征的影响

淑敏^{1,2}, 青云^{1,2}, 敖敦格日乐¹,
红艳^{1,2}, 辛颖^{1,2}, 拉喜那木吉拉^{1*}

(1 内蒙古民族大学 蒙医药学院, 内蒙古通辽 028000; 2 蒙药研发国家地方联合工程研究中心, 内蒙古通辽 028000)

摘要 【目的】研究文冠果幼苗 C、N、P 和 K 分配规律对水分和氮添加的响应, 为探讨水氮环境适应策略和培育高质量苗木提供参考。【方法】采用 2 因素(氮和水)随机区组设计, 设置 4 个氮添加水平[0 (N_0), 5 (N_1), 10 (N_2), 15 (N_3) g/m²]以及 3 个水分条件[适宜水(W_{CK})、干旱(W_d)和充分水(W_w)], 分析 2 种因素组合处理下文冠果幼苗叶、枝、根生态化学计量特征。【结果】(1)氮和水分独立或交互影响幼苗 C、N、P、K 含量, 而化学计量比主要受氮添加影响。在 W_{CK} 条件下, 氮添加均增加 C、N、P 含量; 在 W_d 条件下, N_3 添加通过增加 K 含量, 降低 N、P 含量抵御干旱; W_w 条件下, 仅 N_3 添加有效缓解氮限制。(2)C、N、P、K 营养元素主要集中在叶片, 支持光合和生长; N、P 含量在叶片变异性高, 但 N/P 稳定性强。(3)相同元素在不同器官间相关性较高, 叶和根之间的养分协同性高于枝, 可维持植物稳定生长。【结论】氮添加可缓解氮匮乏, 但可提高 P、K 需求; 建议适宜水分条件下减少氮肥施用, 以减少污染并维持植物生长潜力。

关键词 文冠果幼苗; 氮素和水分; 不同器官; 养分分配; 化学计量特征

中图分类号 S794.9; S718.43 **文献标志码** A

Effects of water and nitrogen additions on the allocation pattern and stoichiometric characteristics of C, N, P, and K in *Xanthoceras sorbifolia* seedlings

SHU Min^{1,2}, QING Yun^{1,2}, Aodungerile¹, HONG Yan^{1,2}, XIN Ying^{1,2}, Laxinamujila^{1*}

(1 Mongolian Medicine College, Inner Mongolnia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 2 National and Local Joint Engineering Research Center for Mongolian Medicine Research and Development, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract [Objective] The study aims to investigate the response of C, N, P, and K distribution to water and nitrogen addition in *Xanthoceras sorbifolia* seedlings in order to provide references for water-nitrogen

收稿日期: 2024-02-22; 修改稿收到日期: 2024-05-24

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021LHMS08031); 内蒙古自治区直属高校基本科研项目(GXKY23Z014); 蒙药研发国家地方联合工程研究中心开放基金项目(MDK2021031); 内蒙古自治区科技项目(2021GG0002); 内蒙古民族大学博士启动基金项目(BS602)

作者简介: 淑敏(1984—), 女, 博士, 主要从事防护林生态研究。E-mail: bcym1984@163.com

* 通信作者: 拉喜那木吉拉, 教授, 主要从事药用植物资源开发研究。E-mail: namujila@126.com

environmental adaptation strategies and high-quality seedling cultivation. [Methods] A two-factor (nitrogen and water) randomized block design was adopted in this study. Four N fertilization levels [N_0 :0 g/m², N_1 :5 g/m², N_2 :10 g/m², and N_3 :15 g/m²] and three levels of water addition [well watered (W_{CK}), drought (W_d), and fully watered(W_w)] were set up to explore the impact on the ecological stoichiometric characteristics of *X. sorbifolia* leaves, branches, and roots. [Results] (1) The C, N, P, and K levels of seedlings were independently or interactively influenced by nitrogen and water, while the stoichiometric ratios were mainly affected by nitrogen addition. Under well-watered conditions (W_{CK}), nitrogen addition increased C, N, and P levels. Under drought conditions (W_d), high nitrogen addition (N_3) could resist drought by increasing K level and decreasing N and P levels. Under well-watered conditions (W_w), only high nitrogen addition (N_3) effectively alleviated nitrogen limitation. (2) C, N, P, and K nutrients were mainly concentrated in leaves, supporting photosynthesis and vegetative growth. The variability of N and P contents in leaves was high, but the N/P ratio remained stable. (3) The same element exhibited a high correlation among different organs, particularly between leaves and roots, maintaining stable growth. [Conclusion] Nitrogen addition alleviates nitrogen deprivation but increases the demand for P and K. It is recommended to reduce nitrogen fertilizer application under suitable water condition to reduce pollution and maintain growth potential.

Key words *Xanthoceras sorbifolia* seedlings; nitrogen and water; different organs; nutrient allocation; stoichiometric characteristics

根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)预测,未来全球环境变化将引发氮富集和降水格局改变^[1],这些变化势必会影响土壤水分和养分有效性,进而改变植物对养分的利用与分配策略,尤其在干旱半干旱地区更加显著^[2]。C、N、P、K 是植物生长发育的基本元素,它们影响植物光合、蒸腾及繁殖等生理过程^[3]。这些元素的含量和计量比能反映植物器官的内稳性以及各元素在不同器官中的分配比例和相互关系,并判断植物生长中的限制性元素和养分利用率^[4-5]。以往研究表明,植物各器官的计量特征在个体间有关联性^[6],元素含量和化学计量比的协同变化有助于维持植物的稳定代谢和生长,能反映其对环境变化的响应和适应^[7-8]。因此,通过研究植物不同器官的生态化学计量学特征有助于了解其生长调节机制和生存策略,是评估全球环境变化下植物响应与适应策略的重要手段。

在干旱与半干旱环境中,土壤水分的稀缺显著制约了植物根系的养分摄取能力,因此,植物不得不发展出一种别具一格的养分配比机制,以此来顽强地适应这种水资源匮乏的生态环境^[9]。在植物体内叶、枝、根构成了一个精细生命网络,叶片通过光合作用合成有机物,稳定养分平衡;根系深入土壤,吸取水分与养分;枝条输送并储存养分,促进植物生长^[10]。为了适应极端环境,当土壤外源氮过多时,植物资源分配到叶和根系中^[7];当土壤氮素供应不足时,植物会表现出对叶片中 N、P、K 的高效利用能力。特别是在干旱环境中,植物对氮的利用能力

会进一步增强,这意味着少量的外源氮补充可以显著提升植物的抗旱能力^[11-12]。然而过量的氮素供给则会抑制植物生长,并可能加剧干旱胁迫带来的负面影响^[13]。当水氮同增时,植物的氮利用能力变得错综复杂,受器官功能、水分状态及氮投入水平等多因素共同影响^[8]。然而植物为维持自身内稳态,通过改变自身各器官对养分吸收的差异适应环境变化和不同环境带来的胁迫,从而表现出器官中化学计量的可塑性^[14-16],这种可塑性不仅揭示植物本身的特性,还有助于更好地理解环境变化背景下植物各器官间的相互作用与联系^[16]。

文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)是中国特有的珍稀油料植物,主要分布于水资源紧缺的“三北”地区,其多功能性备受关注。然而,由于过度采挖,文冠果种群濒危,因此人工栽培的需求逐渐增大。内蒙古自治区为文冠果林区示范基地,所在区域属典型的干旱半干旱地区,对环境变化极为敏感^[2]。目前对文冠果的研究主要集中在生殖、遗传变异、快繁及种子化学成分等方面,而生长与环境变化关联的研究相对较少^[17-18],然而,理解文冠果对环境变化的适应策略对于大面积造林栽培具有至关重要的基础作用。尽管近年来植物器官化学计量学在揭示植物对环境适应策略方面的研究日益增多^[19-20],但针对文冠果这一珍稀濒危植物的特定研究依然相对匮乏。因此,本研究旨在通过调控水氮条件,系统地探讨文冠果幼苗叶、枝、根中 C、N、P、K 的化学计量变化规律,从生态化学计量学角度揭示其养分分配策

略,这不仅有助于更全面地理解文冠果的环境适应机制,也为内蒙古文冠果林区的水肥管理提供科学依据。通过优化水肥管理策略,可以促进文冠果的健康生长,从而有助于文冠果林区的可持续发展。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼中旗花吐古拉镇文冠果种植基地($121^{\circ}55'E$, $43^{\circ}39'N$)。该区在科尔沁沙地的腹部,海拔 180~200 m,年均气温 $5.2^{\circ}C$,年平均日照时间 2 906 h,极端最高气温 $37.8^{\circ}C$,极端最低气温 $-35.9^{\circ}C$,最热月平均气温 $24^{\circ}C$,最冷月平均气温 $-16.2^{\circ}C$,年平均无霜期 140 d,年平均降雨量为 300~450 mm,年相对湿度为 55%~61%。土壤以风沙土为主,植被多为抗旱性较强的沙生植物,属内蒙古植物区系。

1.2 试验材料与研究方法

以 2 年生文冠果幼苗为研究对象,设置盆栽试验。于 2020 年 9 月在自然生长的文冠果母株上采集种子后,2021 年 5 月播种于苗圃地育苗。常规田间管理,只在干旱后进行灌溉,未施肥。2022 年 5 月初在苗圃地选取大小一致的文冠果幼苗移至栽培盆中,每盆栽植 1 株。幼苗株高(43.21 ± 5.14) cm,茎粗(0.48 ± 0.45) cm。盆上径为 36 cm,下径为 30 cm,深 45 cm,每盆装土 25 kg。试验用土取自科尔沁沙地风沙土,过 0.25 mm 筛后分别测定全 C、N、P、K 和速效 N、P、K 含量。C 含量用重铬酸钾容量法-外加热(油浴加热)法测定,全 N 含量采用三酸消解-全自动定氮仪测定,速效 N 含量采用碱解扩散法测定,全 P 含量采用三酸消解-钼锑抗比色法、速效 P 含量采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定,全 K 含量和速效 K 含量采用火焰光度计法测定^[21]。土壤 C 含量 6.89 g/kg,全 N、P、K 含量分别为 0.43, 0.17, 75.43 g/kg,速效 N、P、K 含量分别为 5.67, 2.98, 52.23 mg/kg。待幼苗生长稳定后,进行不同水分和氮添加处理实验。

试验采用 2 因素随机区组设计。基于该研究区氮沉降背景值^[22],并参考以往研究氮处理强度^[23],设置对照(N_0 , 0 g/m²)、低氮(N_1 , 5 g/m²)、中氮(N_2 , 10 g/m²)和高氮(N_3 , 15 g/m²)4 个施氮处理水平。水分处理^[12]则设置适宜水(W_{CK})、干旱(W_d)和充分水(W_w)3 个水平,分别为 1 L/d、0.5 L/d、1.5 L/d,3 种水分处理分别相当于最大田间持水量

的 50%、25%和 65%,且在干旱处理下观察到植株有明显的胁迫现象。试验共组成 12 个处理,每处理 5 盆幼苗(即 5 次重复),共计 60 盆植株。将幼苗全部转移至可移动遮雨棚内,防止天然降水的影响。2022 年 6—8 月,每周施肥 1 次,将固体尿素均匀撒施于土壤中。每天下午用称重法^[24]称花盆质量,补浇土壤蒸发和幼苗蒸腾损失的水分,使各处理土壤含水量符合设置要求。8 月末将幼苗从盆中完整取出,在实验室分成叶、枝、根 3 种器官,之后放入烘箱 60~70 $^{\circ}C$ 烘干 48 h 至恒重,用粉碎机粉碎,过 0.5 mm 筛后分析各器官 C、N、P、K 含量。C 含量用重铬酸钾容量法-外加热(油浴加热)法测定, N 含量采用三酸消解-全自动定氮仪测定法,全 P 含量采用三酸消解-钼锑抗比色法测定,全 K 含量采用三酸消解-火焰光度计法测定^[21]。

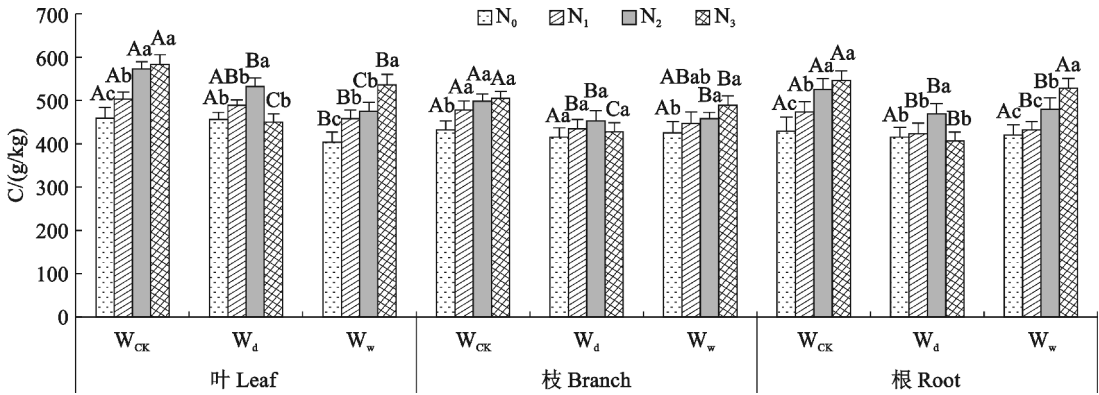
1.3 数据处理

用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验施氮量、水分及其交互作用对文冠果幼苗 C、N、P、K 含量及比值的影响,并用单因素(one-way ANOVA)进行方差分析,Duncan 检验方法进行多重比较。各器官的养分含量及比值的变异系数=标准差/平均值 $\times 100\%$ 。对各器官 C、N、P、K 含量间的关系进行 Pearson 相关性分析。用 Excel 2021、SPSS 23.0 作图。

2 结果与分析

2.1 水氮添加对文冠果幼苗叶、枝、根中的 C、N、P 和 K 含量的影响

将不同水氮添加条件下文冠果幼苗叶、枝、根中 C、N、P、K 含量进行比较,结果如图 1—4 所示。适宜水(W_{CK})条件下,叶、枝、根中 C、N 含量随着氮添加量增加而显著增加;叶 P、K 含量也显著增加($P < 0.05$),但枝和根 P、K 含量无显著响应;在低氮(N_1)至高氮(N_3)添加下,C、N 含量在叶中最高,P、K 含量在中氮(N_2)至高氮(N_3)添加时叶中最高。干旱(W_d)条件下,C、N、P 含量在叶、枝、根中随氮添加量增加先增后减,高氮(N_3)时显著减少($P < 0.05$);K 含量趋势相反,高氮(N_3)时显著增加($P < 0.05$);低氮(N_1)至中氮(N_2)添加时,C 含量在叶中最高($P < 0.05$);高氮(N_3)时,K 含量在叶中最高($P < 0.05$)。充分水(W_w)条件下,C、N 含量在叶、枝、根中随氮添加量增加显著增加($P < 0.05$);P、K 含量无显著变化;低氮(N_1)至高氮(N_3)添加时 C 在叶中最高($P < 0.05$),P、K 在各器官间无显著差异。



不同小写字母代表相同水分处理不同施氮水平间差异显著,不同大写字母代表相同施氮水平不同水分处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 文冠果幼苗叶、枝、根中 C 含量对水氮添加的响应

Different normal letters in the same water treatment indicate significant difference among different nitrogen levels, and different capital letters in the same nitrogen level indicate significant difference among different water treatments at 0.05 level. The same as below.

Fig. 1 Response of C nutrient concentrations to water and nitrogen addition in leaves, branches, and roots of *X. sorbifolia* seedlings

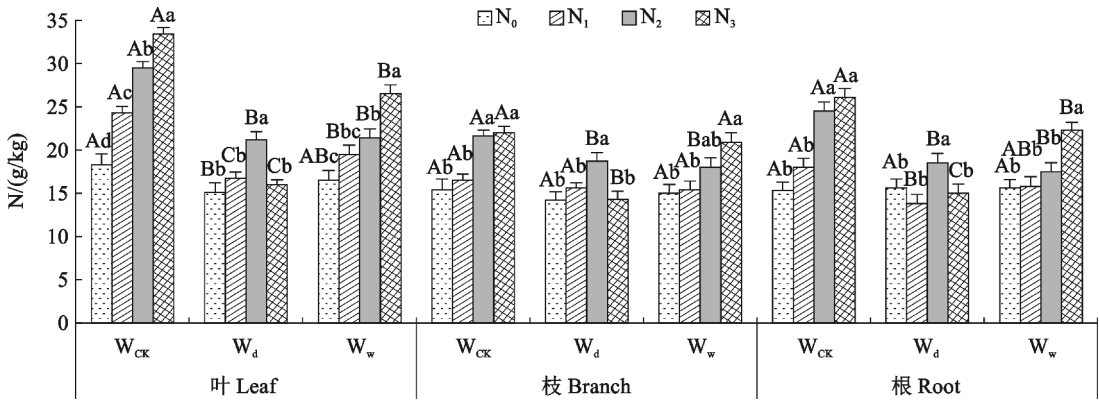


图 2 文冠果幼苗叶、枝、根中 N 含量对水氮添加的响应

Fig. 2 Response of N nutrient concentrations to water and nitrogen addition in leaves, branches, and roots of *X. sorbifolia* seedlings

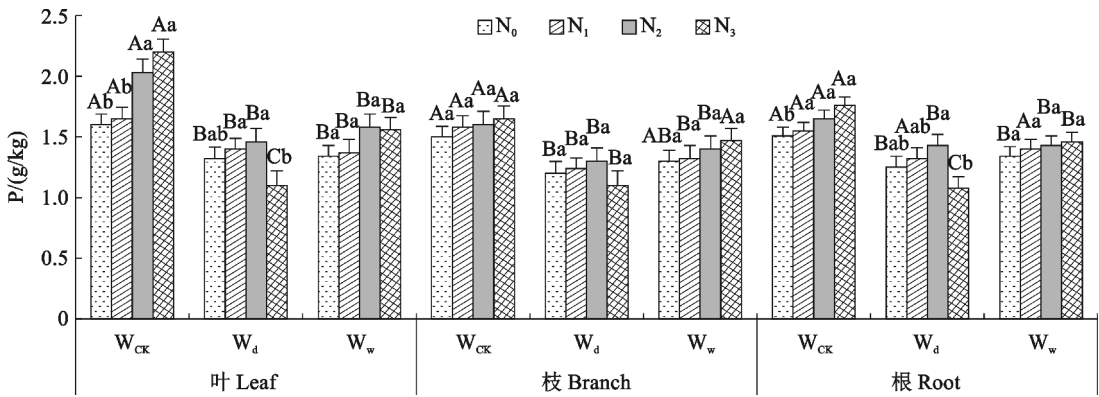


图 3 文冠果幼苗叶、枝、根中 P 含量对水氮添加的响应

Fig. 3 Response of P nutrient concentrations to water and nitrogen addition in leaves, branches, and roots of *X. sorbifolia* seedlings

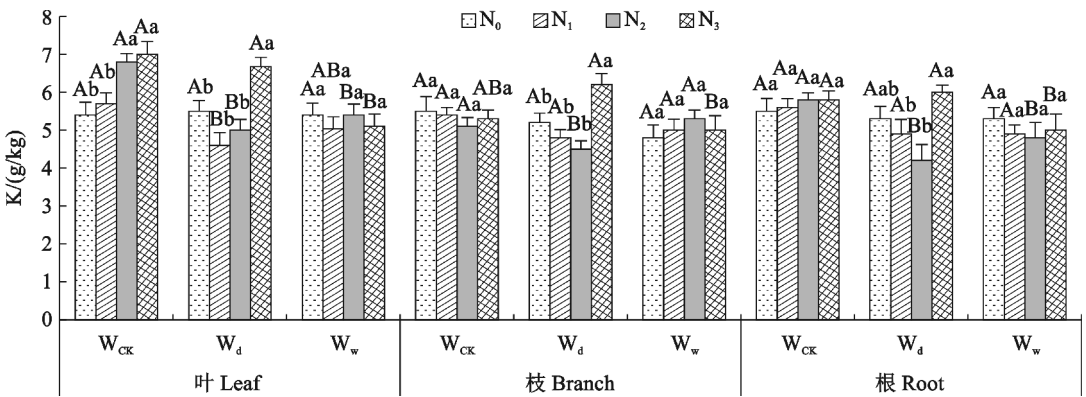


图 4 文冠果幼苗叶、枝、根中的 K 含量对水氮添加的响应

Fig. 4 Response of K nutrient concentrations to water and nitrogen addition in leaves, branches, and roots of *X. sorbifolia* seedlings

在低、中和高氮(N₁、N₂和N₃)水平上,随水分增加,叶、枝和根的C、N、P含量以及叶中的K含量均呈先增加后减少的趋势($P<0.05$);在高氮(N₃)水平上,随水分增加,枝与根的K含量均呈显著减少趋势($P<0.05$),这一发现揭示了水分与氮素交互作用对植物体内元素分配的重要影响。

2.2 水氮添加对文冠果幼苗叶、枝、根中的 C、N、P 和 K 化学计量比的影响

将在不同水氮添加条件下文冠果幼苗叶、枝、根的化学计量比进行比较,结果如表1所示。在适宜水(W_{CK})条件下:随着氮添加量增加,C/N显著减少($P<0.05$),而C/K、C/P、N/P、N/K均显著增加($P<0.05$);叶N/P在低氮(N₁)至中氮(N₂)时,为14~16,在高氮(N₃)时大于16;叶N/K为3.3~5.7。在干旱(W_d)条件下,氮添加导致C/N先减后增,C/P和N/P均增加,C/K先增后减;低氮(N₁)至中氮(N₂)时,叶N/P为14~16,叶N/K为2.4~4.2。在充分水(W_w)条件下,氮添加导致C/N显著减少($P<0.05$),C/K、N/P、N/K均显著增加($P<0.05$);低氮(N₁)至中氮(N₂)时,叶N/P小于14,高氮(N₃)时大于16;叶N/K为3.2~5.2;K/P小于3.4。在低、中和高氮(N₁、N₂和N₃)水平上,随水分增加,叶、枝和根的C/N、C/P、C/K(除了N₂和N₃水平的根C/K和N₃水平的枝C/K)均呈先减后增趋势($P<0.05$)。高氮(N₃)水平上,随水分增加,叶、枝和根N/P呈升高趋势($P<0.05$),而N/K呈先增后减趋势($P<0.05$)。

2.3 水氮及交互作用对文冠果幼苗 C、N、P 和 K 含量及其化学计量比的影响

双因素方差分析水和氮2种处理对叶、枝、根中

C、N、P、K含量和化学计量比的影响。结果(表2)表明,文冠果幼苗叶和根与枝相比,C、N、P和K含量对水分和氮添加及交互作用下均表现出显著影响。水分和氮添加及交互作用分别对各器官N含量的影响达到极显著水平($P<0.01$);氮添加处理对叶和根的C、N、P、K含量和化学计量比均有极显著影响($P<0.01$),而对枝的K含量影响未达到显著水平。水分处理对叶和根的C、N、P、C/N和N/P影响均达到极显著水平($P<0.01$),对叶和根的K影响达到显著水平($P<0.05$)。水氮的交互作用对叶和根C、N、C/K、N/P影响达到极显著水平($P<0.01$)。

2.4 水氮添加对文冠果幼苗 C、N、P 和 K 含量及化学计量比分布规律的影响

不同水氮添加条件下,文冠果幼苗的C、N、P、K含量及比值在各器官中呈现不同的分布规律(表3)。C含量变化为403.21~583.41 g/kg,叶片中的C平均含量显著高于根和枝($P<0.05$)。N含量为14.22~33.41 g/kg,同样在叶片中N含量最高,其次是根,最后是枝($P<0.05$)。P和K含量分别为1.09~2.21 g/kg和4.03~6.67 g/kg,叶、根、枝之间差异不显著。C/N、C/P、C/K和K/P均为枝>根>叶,而N/P、N/K则为叶>根>枝。

在变异系数方面,C含量在叶中最高,N、P、K含量在枝和根中较高。C/N、C/P、C/K和N/P的变异系数在根中最高,N/K在叶中最高,K/P在枝中最高。总体来看,N含量的变异系数在各器官中均超过P和K含量,而N、P含量的变异系数大于其比值N/P。

表 1 文冠果幼苗叶、枝、根中营养元素化学计量比对水氮添加的响应

Table 1 Response of stoichiometric ratio of nutrient elements to water and nitrogen addition in leaves, branches, and roots of *X. sorbifolia* seedlings

器官 Organ	处理 Treatment	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	K/P	
叶 Leaf	W _{CK}	N ₀	25.1±2.1Ba	286.9±21.3Ba	83.4±5.4Ab	11.4±0.92Ab	3.3±0.34Ab	3.4±0.24Aa
		N ₁	20.7±2.5Cb	292.8±16.7Ba	88.2±6.3Bab	14.7±1.03Aab	4.3±0.38Aab	3.5±0.32Aa
		N ₂	19.4±2.2Cb	294.3±23.4Ba	94.5±5.1Ba	15.3±1.12Aa	5.1±0.31Aa	2.9±0.39Aa
		N ₃	17.5±2.9Bb	304.4±28.7Ca	104.6±4.9Aa	16.6±1.32Aa	5.7±0.45Aa	2.7±0.27Ba
	W _d	N ₀	30.2±3.1Aa	345.4±24.3Ab	82.9±7.5Ab	11.5±0.93Ab	2.7±0.29Ab	4.2±0.41Ab
		N ₁	29.3±3.6Aa	349.4±27.6Ab	106.3±8.2Aa	14.8±0.89Aa	3.6±0.43Aa	3.3±0.26Ab
		N ₂	25.1±2.5Ab	364.4±19.8Ab	103.6±7.2Aa	15.4±1.11Aa	4.2±0.28Aa	3.4±0.19Ab
		N ₃	28.1±2.3Aab	409.6±22.6Ba	63.4±6.3Bc	13.2±1.03Bab	2.4±0.37Bb	6.1±0.45Aa
	W _w	N ₀	23.6±2.5Bab	300.4±24.8ABb	74.6±5.3Bb	12.8±1.12Ab	3.2±0.25Ab	4.1±0.34Aa
		N ₁	24.1±2.8Ba	334.3±22.3ABb	98.1±4.9ABa	13.5±1.06Ab	3.8±0.39Ab	3.7±0.24Aa
		N ₂	22.2±1.9Bab	300.7±18.7Bb	100.8±6.4ABa	13.3±0.99Ab	4.1±0.42Ab	3.4±0.28Aa
		N ₃	20.2±2.3Bb	443.3±27.6Aa	103.2±6.9Aa	17.3±1.05Aa	5.2±0.34Aa	3.3±0.33Ba
枝 Branch	W _{CK}	N ₀	28.1±4.3Aa	288.5±22.5Ba	72.3±5.2Bb	10.3±1.03Ab	2.8±0.28Ab	3.7±0.27Aa
		N ₁	27.4±3.2Aa	288.8±23.1Ba	85.7±5.9Aa	10.4±0.87Ab	3.2±0.18Ab	3.4±0.33Aa
		N ₂	23.8±3.0Ab	299.6±27.6Ba	87.8±6.3Ba	13.5±0.83Aa	4.2±0.32Aa	3.2±0.42Aa
		N ₃	23.7±2.1Bb	312.7±30.1Ba	94.5±6.9Aa	13.3±0.92Aa	4.5±0.33Aa	3.2±0.37Ba
	W _d	N ₀	29.2±4.5Aa	345.4±19.4Ab	79.8±5.3ABb	11.8±0.99Ab	2.7±0.43Ab	4.3±0.39Ab
		N ₁	27.9±4.1Aab	350.8±23.1Ab	90.4±7.8Aa	12.6±1.02Aab	3.3±0.27Aab	3.9±0.28Ab
		N ₂	24.2±2.5Ab	348.3±32.1Ab	102.6±8.3Aa	14.4±1.11Aa	4.2±0.32Aa	3.5±0.31Ab
		N ₃	29.9±5.3Aa	389.5±30.8Aa	81.8±7.1Bb	13.0±0.78Aa	2.4±0.29Bb	5.4±0.29Aa
	W _w	N ₀	29.3±4.7Aa	326.3±28.9ABa	84.3±7.3Ab	11.2±0.93Ab	3.0±0.43Ab	3.7±0.18Aa
		N ₁	29.1±4.9Aa	338.2±27.5ABa	91.2±5.8Aab	11.7±0.81Ab	3.1±0.29Ab	3.8±0.22Aa
		N ₂	26.9±2.4Aab	351.1±33.4Aa	96.7±6.4Aa	13.1±1.08Aa	3.5±0.43Aab	3.8±0.18Aa
		N ₃	24.1±2.1Bb	340.9±31.5Ba	101.4±6.7Aa	14.2±1.14Aa	4.2±0.29Aa	3.4±0.26Ba
根 Root	W _{CK}	N ₀	28.1±3.3Aa	284.4±21.5Bb	63.4±6.4Bb	10.1±1.02Bb	2.8±0.34Ab	3.6±0.27Aa
		N ₁	26.3±2.8Ba	305.6±25.4Aab	78.8±6.7Bb	11.6±0.89Ab	3.2±0.19Ab	3.6±0.33Aa
		N ₂	21.4±2.1Ab	318.1±29.1Aa	99.1±5.2Ba	14.8±0.93Aa	4.2±0.33Aa	3.5±0.29Aa
		N ₃	20.8±1.8Bb	322.2±33.5Ba	108.6±5.1Aa	14.7±0.98ABa	4.5±0.32Aa	3.3±0.38Ba
	W _d	N ₀	26.6±2.6Ab	335.1±27.1Ab	64.8±6.5Bc	12.5±0.82Aab	2.9±0.17Ab	4.2±0.41Ab
		N ₁	30.7±2.2Aa	333.9±25.4Ab	86.3±5.6ABb	10.9±0.89Ab	2.8±0.23Ab	3.9±0.37Abc
		N ₂	23.4±1.6Ab	328.2±22.3Ab	111.7±7.8Aa	12.9±0.92Ba	4.4±0.27Aa	2.9±0.35Ac
		N ₃	27.1±2.4Aa	375.6±19.7Aa	90.2±7.1Bb	13.4±0.81Ba	2.5±0.19Bb	5.6±0.39Aa
	W _w	N ₀	26.9±2.7Aa	313.1±20.3ABb	79.2±5.8Ab	11.6±0.79ABb	2.9±0.28Ab	4.0±0.41Aa
		N ₁	26.7±1.6Ba	308.4±17.6Ab	93.9±4.7Aa	11.3±1.06Ab	3.3±0.31Aab	3.5±0.21Aa
		N ₂	23.9±1.5Ab	335.2±26.3Aab	96.2±7.3Ba	14.2±1.13Aa	4.2±0.27Aa	3.4±0.19Aa
		N ₃	23.7±2.1ABb	361.8±29.4Aa	97.8±5.5Ba	15.3±1.17Aa	4.4±0.32Aa	3.4±0.35Ba

注:不同小写字母代表相同水分处理不同施氮水平间差异显著,不同大写字母代表相同施氮水平不同水分处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different normal letters in the same water treatment indicate significant difference among different nitrogen levels, and different capital letters in the same nitrogen level indicate significant difference among different water treatments at 0.05 level.

表 2 文冠果幼苗叶、枝、根的 C、N、P 和 K 含量及计量比的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of C, N, P, and K contents and stoichiometric ratios in leaves, branches, and roots of *X. sorbifolia* seedlings

元素 Element	叶 Leaf			枝 Branch			根 Root		
	N	W	N×W	N	W	N×W	N	W	N×W
C	23.355**	19.028**	10.141**	9.456**	6.723**	4.147*	18.343**	11.028**	7.141**
N	14.345**	23.213**	8.978**	9.384**	12.112**	5.998**	16.384**	12.112**	7.978**
P	5.033**	6.601**	3.333*	1.923	4.032*	1.011	7.782**	4.523**	3.234*
K	6.341**	3.127*	4.285*	2.939	2.127	1.485	6.992**	4.327*	3.485*
C/N	21.343**	9.454**	7.242**	4.546*	6.673**	0.935	11.342**	13.321**	5.245**
C/P	10.742**	1.957	0.877	6.722**	0.957	0.529	12.047**	0.957	1.765
C/K	13.597**	0.334	4.651**	7.593**	0.134	2.644	9.556**	0.134	2.132
N/P	7.467**	10.361**	5.694**	5.451**	7.361**	3.691*	10.451**	11.361**	9.694**
N/K	9.732**	0.865	0.214	5.777**	0.561	0.092	5.776**	0.961	0.103
K/P	4.558*	0.599	1.432	3.158*	0.023	0.122	4.056*	0.763	1.023

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。N 表示施氮量; W 表示水分添加。

Note: * indicates $P<0.05$. ** indicates $P<0.01$. N indicates nitrogen addition. W indicates water addition.

表 3 文冠果幼苗叶、枝、根的 C、N、P 和 K 含量及计量比的分配特征

Table 3 Distribution characteristics of C, N, P, and K contents and stoichiometric ratios in leaves, branches, and roots of *X. sorbifolia* seedlings

元素 Element	器官 Organ	最小值 Min/(g/kg)	最大值 Max/(g/kg)	平均值 Mean/(g/kg)	标准差 Standard deviation/(g/kg)	变异系数 Coefficient of variation/%
C	叶 Leaf	403.21	583.41	493.63	42.34	8.65
	枝 Branch	501.42	415.11	459.75	20.89	4.54
	根 Root	415.16	543.47	461.91	23.07	5.01
N	叶 Leaf	15.45	33.41	17.03	1.58	9.33
	枝 Branch	14.22	22.34	11.32	1.71	15.15
	根 Root	15.31	26.01	14.89	1.88	12.62
P	叶 Leaf	1.15	2.21	1.55	0.13	8.45
	枝 Branch	1.09	1.71	1.38	0.17	12.34
	根 Root	1.11	1.83	1.44	0.19	13.27
K	叶 Leaf	4.03	6.67	5.33	0.31	5.81
	枝 Branch	4.84	5.51	5.12	0.37	7.22
	根 Root	4.23	6.01	5.19	0.42	8.09
C/N	叶 Leaf	17.51	29.34	23.79	2.18	9.16
	枝 Branch	23.72	29.24	26.97	3.91	14.49
	根 Root	20.82	30.72	25.63	3.64	14.21
C/P	叶 Leaf	235.14	403.31	336.75	20.06	5.98
	枝 Branch	288.42	389.52	416.63	25.08	6.02
	根 Root	284.41	375.12	365.86	24.41	6.78
N/P	叶 Leaf	11.42	17.34	14.21	0.83	5.83
	枝 Branch	10.21	14.27	11.78	1.12	9.52
	根 Root	10.11	15.30	12.44	1.14	9.22
C/K	叶 Leaf	79.16	104.32	87.04	5.12	5.88
	枝 Branch	63.41	119.66	99.61	6.43	6.52
	根 Root	63.45	114.31	96.12	6.61	6.67
N/K	叶 Leaf	2.42	5.21	3.96	0.43	10.86
	枝 Branch	2.41	4.56	3.43	0.31	9.04
	根 Root	2.83	4.57	3.52	0.32	9.09
K/P	叶 Leaf	3.05	5.27	3.23	0.36	8.51
	枝 Branch	4.11	5.76	4.68	0.32	6.83
	根 Root	3.22	5.56	3.72	0.34	9.14

2.5 文冠果幼苗叶、枝、根中的 C、N、P 和 K 含量以及化学计量比的相关性

在不同水氮添加条件下,文冠果幼苗各器官间的相同元素含量表现出特定的相关性(表 4)。具体来说,C 含量在叶与根之间显著正相关,叶与枝之间呈显著负相关;N 含量则在叶与枝、枝与根之间均显著正相关;P 含量在叶与枝、叶与根、枝与根之间

均显著正相关;K 含量则在叶与枝、枝与根之间显著正相关。

此外,同一器官内不同元素之间的相关性普遍较弱,仅枝中的 C 与 N、叶中的 C 与 P、N 与 K、根中的 N 与 P 表现出显著正相关。另外,叶片中的 N 含量与所有器官的 K 含量显著正相关,而枝中的 C 含量则与所有器官的 N 含量显著正相关。

表 4 文冠果幼苗 C、N、P 和 K 含量在叶、枝、根中的相关性

Table 4 Correlation between C, N, P, and K contents in leaves, branches, and roots of *X. sorbifolia* seedlings

指标 Index	C			N			P			K		
	叶 Leaf	枝 Branch	根 Root	叶 Leaf	枝 Branch	根 Root	叶 Leaf	枝 Branch	根 Root	叶 Leaf	枝 Branch	根 Root
C	叶 Leaf	1										
	枝 Branch	0.672 *	1									
	根 Root	-0.240	-0.180	1								
N	叶 Leaf	-0.491 *	-0.627 *	0.265	1							
	枝 Branch	0.658 *	0.906 **	-0.223	-0.634 *	1						
	根 Root	0.579 *	0.937 **	-0.221	-0.552 *	0.960 **	1					
P	叶 Leaf	0.501 *	0.602 *	0.125	0.557 *	0.595 *	0.272	1				
	枝 Branch	0.198	0.008	0.529 *	0.088	-0.016	-0.053	0.301	1			
	根 Root	0.883 **	0.896 **	-0.116	-0.522 *	0.880 **	0.850 **	0.701 **	0.145	1		
K	叶 Leaf	0.372	0.947 **	-0.186	-0.714 **	0.939 **	0.935 **	0.821 **	-0.124	0.879 **	1	
	枝 Branch	-0.233	-0.185	0.921 **	0.265	-0.222	-0.221	0.654 **	0.529 *	-0.117	-0.183	1
	根 Root	-0.302	-0.214	0.514 *	0.543 *	-0.393	-0.253	0.789 **	0.265	-0.351	-0.352	0.315

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。
Note: * indicates $P<0.05$. ** indicates $P<0.01$.

3 讨论

3.1 水氮添加对文冠果幼苗 C、N、P、K 化学计量特征的影响

N、P、K 是影响植物生长与发育的限制性元素,其生态化学计量比特征对植物生长发育和养分供给状况具有指示作用,其中叶片 C/N 和 C/P 的比值越大,意味着植物吸收营养化学元素时所能同化 C 的能力越强,反映了植物对营养元素的吸收与利用效率^[25]。N/P、N/K 和 K/P 阈值假说^[26]认为叶片的 N/P、N/K 和 K/P 可以指示植物生长活动受限制的元素,一般植物 $N/P<14$ 时受 N 限制,而 $N/P>16$ 时受 P 限制,介于 $14<N/P<16$ 时受 N 和 P 的共同限制; $N/P>14$ 、 $K/P>3.4$ 时,植物倾向于受 P 限制或 P 和 N 共同限制,当 $2.1<N/K<3.4$ 时,植物倾向于受 K 限制或 K 和 N 共同限制, $N/K>3.4$ 时受 K 的限制。而植物生态化学计量对氮添加的响应往往在不同水分条件下表现出不同规律^[27]。以往研究发现,在干旱条件下,氮添加对植

物生物量及其化学计量的影响相对较弱;而在水分充足时,氮则成为主导因素,显著影响植物生理生态过程^[28]。本研究发现,文冠果幼苗的叶和根中 C、N、P、K 含量受到水氮添加的独立或交互作用的影响,而其化学计量比只对氮添加敏感。在适宜水 (W_{CK}) 条件下,随着氮添加量的增加,叶、枝、根的 C、N、P、K 含量以及 C/P、C/K、N/P 和 N/K 均显著增加,只有 C/N 呈减少趋势。这可能首先与 N 的有效性提升有关,根系首先感知到土壤中 N 的增加,增强了 N 的吸收能力^[8]。然后随着 N 吸收的增多文冠果幼苗体内 N 的利用效率降低,而 P 和 K 的利用效率提升^[29]。在低氮 (N_1) 和中氮 (N_2) 添加时,叶 N/P 处于 $14\sim16$ 之间、 $N/K>3.4$,表明文冠果幼苗生长受 N、P 和 K 的限制;当高氮 (N_3) 添加时有所变化,叶 $N/P>16$ 、 $N/K>3.4$,土壤中 N 的有效性提高,但依然受 P 和 K 的限制,这些结果再次证实了植物在养分供应不足时倾向于提高养分利用效率的生存策略^[29]。在干旱 (W_d) 环境下,随着氮添加量的增加,文冠果幼苗各器官 N、P 含量先增

后减。在干旱沙地环境中植物因水分限制需增加游离氨基酸维持细胞渗透平衡^[12],进而提高 N、P 含量,保障光合作用并为植物生长提供物质能源^[19]。当高氮(N₃)添加时,干旱胁迫下高浓度养分产生栓塞现象^[30],阻碍元素吸收与运输,使得 N、P 含量减少,而 K 含量表现为增加趋势,这可能是植物通过增加 K 含量调控水分传导,增强叶片光合、蒸腾及酶活性,以抵御干旱胁迫^[31]。研究还发现,在低氮(N₁)和中氮(N₂)添加时叶 N/P 处于 14~16 之间、N/K>3.4,而当高氮(N₃)添加时叶 N/P<14, 2.1<N/K<3.4 表明受 N 限制或 N 和 K 共同限制。因此在干旱环境下适当施氮不仅可以缓解干旱对植物养分平衡的影响,而且 N 的限制作用会减弱,但过量施肥则增强 N 限制作用^[12]。在充分水(W_w)条件下,随着氮添加量增加,文冠果幼苗的叶、枝、根中 C、N 含量显著增加,而 P、K 含量无显著变化,并且高氮(N₃)添加时,叶 N/P>16、N/K>3.4,说明受 P 和 K 限制。该结果可能与沙地土壤保水保肥能力受限,导致短期水氮添加无法有效缓解 P、K 缺乏现象有关^[32]。因此在科尔沁沙地这样的环境中,过度灌溉不仅是对水资源的极大浪费,导致地下水位下降^[33],而且不利于植物吸收养分和提高产量,甚至会改变生态系统的养分循环过程^[25]。

3.2 文冠果幼苗叶、枝、根中 C、N、P、K 元素分配策略

文冠果幼苗在 C、N、P、K 元素的分配上表现出规律性,在叶片中富集程度显著超过根和枝(表 3)。在生长季节中,幼苗通过根系吸收大量 N、P、K 养分,并优先输送至叶片,确保其生理代谢需求得到满足,进而推动幼苗的迅速生长^[34]。然而,这可能导致根部 N、P、K 的相对缺乏,而适量添加外源氮肥是一个有效的方法^[12]。文冠果幼苗的 C/N、C/P 和 C/K 的分配规律为枝和根大于叶,该现象表明在生长过程中,根和枝对于 N、P、K 的利用效率更为显著,以支持它们的基本生理代谢活动。由于根和枝所处的营养环境可能较为贫瘠,所以它们需要更高效地利用这些关键养分以确保自身的正常生长和发育^[16]。本研究结果还显示,在不同氮添加条件下,文冠果幼苗叶 N/P 大多在 14~16 之间,表明叶片受 N 和 P 共同限制;而枝和根的 N/P 大多显著小于 14,主要受 N 限制。这进一步证实了幼苗通过根系吸收 N 并转运至叶片以支持光合作用等过程,导致枝和根中 N 的相对缺乏^[19]。此外,文冠果幼苗的 C 含量变异系数表现出叶大于根和枝,而 N、P、K 含量变异系数则表现为根和枝大于叶。这差异主要是

由于 C 作为构成植物骨架性物质的主要成分,枝和根这些起输导和支撑作用的器官主要由富含 C 元素的多糖物质如木质素和纤维素组成,因此其稳定性高于叶。N、P、K 作为重要的营养元素,主要参与光合产物、氨基酸的合成,呼吸作用以及生长消耗等过程^[34]。这些元素被优先选择性地供给叶片,因此叶片中的稳定性高于根和枝。N/P 变异系数的排序为枝和根大于叶,这进一步证明了叶片在调控养分稳定性方面的能力强于其他器官。同时发现各器官的 N/P 稳定性均强于 N 和 P 本身,这与以往研究中 N/P 具有较高稳定性的结论^[35]相一致,凸显了 N/P 在养分管理和环境适应中的核心地位。

3.3 文冠果幼苗叶、枝、根中 C、N、P 和 K 元素的相关性

在植物生长发育中,内部机制调控器官间的营养元素分配,确保养分合理利用与植物体内平衡^[36]。本研究结果显示,不同水氮条件下,文冠果幼苗体内元素含量在各器官间正相关,其中 N 与 P 在叶和根中正相关,但在枝中则相关性不明显,表明 N 和 P 在生理代谢旺盛的器官中协同作用,而在运输器官中受多种因素影响而分布不均。叶 C、N、P 含量间均呈现显著相关,共同影响着植物的生理代谢过程。由于 C 的固定需大量 ATP,此过程依赖 N,而 N 是叶绿素及多种酶的关键组成,对光合作用和碳固定至关重要。同时,P 作为构成植物能量物质(ATP)及 RNA 的主要成分,在组织器官的形成和发育中扮演着重要作用^[37]。另外,叶 N 与根 P 含量呈负相关,与根 K 含量正相关,叶 P 含量与各器官 K 含量呈显著正相关,这说明文冠果幼苗 N 分配与根系 P、K 吸收密切相关,P 分配受叶 N 供应和 K 吸收共同影响。在水氮条件变化下,文冠果幼苗叶与根养分协同性高于枝,可能与根系养分周转能力差异及应对养分吸收与分配挑战的复杂性有关。这些结论对于干旱半干旱地区的植物养分管理具有参考价值。然而,鉴于盆栽试验和单一株龄的局限性,未来需在更广泛的沙地生态系统中进一步验证,同时关注文冠果幼苗的长期生长表现及精准施肥措施,以支持生态恢复和可持续发展。

4 结 论

(1)文冠果幼苗叶和根的 C、N、P、K 含量受氮和水分添加独立或交互作用的影响,而化学计量比主要受氮添加的显著影响。在适宜水(W_{CK})条件下,氮添加增加了叶、枝、根的 C、N、P 含量,在低氮(N₁)

和中氮(N₂)添加时,缓解了 N、P 限制;干旱(W_d)条件下,氮添加通过提高 K 含量并降低 N、P 含量以抵御干旱胁迫;在增水(W_w)条件下,氮添加效果减弱。因此,文冠果育苗过程中,维持适宜灌水量(最大田间持水量的 50%)是优化氮添加效果的关键。

(2)文冠果幼苗 C、N、P、K 元素主要分配于叶

片,N、P 含量在叶中变异性最显著,而 N/P 稳定性较强,这反映了叶片在养分利用中的重要作用。

(3)同一种元素含量在不同器官间相关性高,叶与根养分协同性高于枝,有助于适应环境变化。在不同水分条件下,氮添加改变了文冠果幼苗的养分限制,从 N 限制转向 P、K 限制。

参考文献:

[1] IPCC. BASIS: Summary for policy makers; Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. IPCC: Geneva, Switzerland, 2021.

[2] YAHDJIAN L, GHERARDI L, SALA O E. Nitrogen limitation in arid-subhumid ecosystems: A meta-analysis of fertilization studies[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(8): 675-680.

[3] ELSER J, STERNER R, GOROKHOVA E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.

[4] 张天霖, 邱治军, 吴仲民, 等. 粤北针阔混交林不同器官碳氮磷钾的生态化学计量特征[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 149-157.

ZHANG T L, QIU Z J, WU Z M, *et al.* Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium in organs of coniferous-broadleaved mixed forest in northern Guangdong[J]. *Forest Research*, 2021, 34(2): 149-157.

[5] 王飞, 郭树江, 张卫星, 等. 民勤荒漠区主要灌木叶片 C、N、P 化学计量特征的季节变化[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(1): 121-129.

WANG F, GUO S J, ZHANG W X, *et al.* Seasonal variations of C, N and P stoichiometry characteristics in leaves of main shrubs in Minqin arid desert area[J]. *Acta Botanica Borali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(1): 121-129.

[6] ZHANG J H, HE N, LIU C C, *et al.* Allocation strategies for nitrogen and phosphorus in forest plants[J]. *Oikos*, 2018, 127: 1506-1514.

[7] 戚燕强, 郑听, 张子雄, 等. 白芨不同器官干物质积累及氮、磷、钾化学计量特征[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(3): 157-162.

QI Y Q, ZHENG T, ZHANG Z X, *et al.* Study on dry matter accumulation and stoichiometric characteristics of N, P and K in different organs of *Bletilla striata*[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(3): 157-162.

[8] 王凯, 高爽, 刘焕彬, 等. 施氮与增水对杨树幼苗不同器官碳氮磷化学计量的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3870-3880.

WANG K, GAO S, LIU H B, *et al.* Effects of nitrogen and water addition on C, N, P stoichiometry in different organs of poplar seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12): 3870-3880.

[9] KOU L, CHEN W W, JIANG L, *et al.* Simulated nitrogen deposition affects stoichiometry of multiple elements in resource-acquiring plant organs in a seasonally dry subtropical forest[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 624: 611-620.

[10] 李俊慧, 彭国全, 杨冬梅. 常绿和落叶阔叶物种当年生小枝茎长度和茎秆细率对展叶效率的影响[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(6): 650-660.

LI J H, PENG G Q, YANG D M. Effect of stem length to stem slender ratio of current-year twigs on the leaf display efficiency in evergreen and deciduous broadleaved trees[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(6): 650-660.

[11] 陈妮娜, 吕慧捷, 张益瑞, 等. 干旱程度和施氮水平对春玉米叶片碳氮含量及碳氮比的影响[J]. *气象与环境学报*, 2023, 39(3): 106-116.

CHEN N N, LÜ H J, ZHANG Y R, *et al.* Effects of drought degree and nitrogen application level on leaf C and N contents and C/N ratio of spring maize[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2023, 39(3): 106-116.

[12] 余洋, 张志浩, 杨建明, 等. 疏叶骆驼刺叶、根生态化学计量特征对水氮添加的响应[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(2): 551-559.

YU Y, ZHANG Z H, YANG J M, *et al.* Stoichiometric characteristics of leaves and fine roots in *Alhagi sparsifolia* in response to the addition of nitrogen and water[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2): 551-559.

[13] 段娜, 李清河, 陈晓娜, 等. 模拟干旱和氮沉降对唐古特白刺根系生长特征的影响[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 956-961.

DUAN N, LI Q H, CHEN X N, *et al.* Combined effects of simulated drought stress and nitrogen deposition on root growth characteristics of *Nitraria tangutorum*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 956-961.

[14] 邵珊瑚. 氮沉降和干旱胁迫对毛竹实生苗生长及氮代谢的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.

[15] 闫景明, 周晓兵, 张静, 等. 新疆野苹果枝条化学计量海拔变异特征研究[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 450-459.

YAN J M, ZHOU X B, ZHANG J, *et al.* Variation in one-year-old branch stoichiometry of *Malus sieversii* at different altitudes and the influencing factors in Tianshan Mountains, China[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(2): 450-459.

[16] 陈佳瑞, 王国梁, 孟敏, 等. 干旱胁迫对 3 种灌木不同器官化学计量特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 73-81.

CHEN J R, WANG G L, MENG M, *et al.* Effects of drought stress on the stoichiometric characteristics in different organs of three shrub species[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 73-81.

[17] 肖明敏, 刘建海, 杨道虎, 等. 水分胁迫对文冠果幼苗生长性状的影响[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(18): 117-119.

XIAO M M, LIU J H, YANG X H, *et al.* Effects of water stress on growth properties of *Xanthoceras sorbifolia* seed-

- lings[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48 (18): 117-119.
- [18] 谢志玉,张文辉. 干旱和复水对文冠果生长及生理生态特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1759-1767.
XIE Z Y, ZHANG W H. Effects of drought and rewating on growth and photosynthetic physioecological characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1759-1767.
- [19] 董雪, 海鹭, 韩春霞, 等. 干旱区降雨梯度对沙冬青根-茎-叶生态化学计量特征的影响[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(5): 60-71.
DONG X, HAI L, HAN C X, *et al.* Effects of precipitation gradient on ecological stoichiometric characteristics in root-stem-leaf of *Ammopiptanthus mongolicus* in arid region [J]. *Forest Research*, 2023, 36(5): 60-71.
- [20] 王亚飞, 杨红青, 周欧, 等. 水氮耦合下高密度毛白杨纸浆林树木各器官化学计量特征[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(12): 68-79.
WANG Y F, YANG H Q, ZHOU O, *et al.* Chemical stoichiometry characteristics of various organs of trees in high-density *Populus tomentosa* pulp forests under water-nitrogen coupling [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45 (12): 68-79.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 顾峰雪, 黄玫, 张远东, 等. 1961—2010 年中国区域氮沉降时空格局模拟研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3591-3600.
GU F X, HUANG M, ZHANG Y D, *et al.* Modeling the temporal-spatial patterns of atmospheric nitrogen deposition in China during 1961—2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3591-3600.
- [23] 蒋德明, 周全来, 阿拉木萨, 等. 科尔沁沙地植被生产力对模拟增加降水和氮沉降的响应[J]. *生态学杂志*, 2011, 30 (6): 1070-1074.
JIANG D M, ZHOU Q L, Alamusa L, *et al.* Responses of vegetation productivity in Horqin Sand Land to simulated increased precipitation and nitrogen deposition [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6): 1070-1074.
- [24] 雷虹, 王凯, 田浩, 等. 小叶锦鸡儿幼苗非结构性碳水化合物积累及分配对干旱胁迫的响应[J]. *生态学杂志*, 2017, 36 (11): 3168-3175.
LEI H, WANG K, TIAN H, *et al.* Responses of non-structural carbohydrates accumulation and distribution of *Caragana microphylla* seedlings to drought stress [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(11): 3168-3175.
- [25] 田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(7): 682-713.
TIAN D, YAN Z B, FANG J Y. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(7): 682-713.
- [26] OLDE VENTERINK H, WASSEN M J, VERKROOST A W M, *et al.* Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands[J]. *Ecology*, 2003, 84(8): 2191-2199.
- [27] LÜ X T, KONG D L, PAN Q M, *et al.* Nitrogen and water availability interact to affect leaf stoichiometry in a semi-arid grassland[J]. *Oecologia*, 2012, 168(2): 301-310.
- [28] SCHUSTER M J, SMITH N G, DUKES J S. Responses of aboveground C and N pools to rainfall variability and nitrogen deposition are mediated by seasonal precipitation and plant community dynamics[J]. *Biogeochemistry*, 2016, 129(3): 389-400.
- [29] 刘洋, 张健, 陈亚梅, 等. 氮磷添加对巨桉幼苗生物量分配和 C : N : P 化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(10): 933-941.
LIU Y, ZHANG J, CHEN Y M, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on biomass allocation and C : N : P stoichiometric characteristics of *Eucalyptus grandis* seedlings[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(10): 933-941.
- [30] 李荣, 党维, 蔡靖, 等. 6 个耐旱树种木质部结构与栓塞脆弱性的关系[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(3): 255-263.
LI R, DANG W, CAI J, *et al.* Relationships between xylem structure and embolism vulnerability in six species of drought tolerance trees[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40 (3): 255-263.
- [31] SARDANS J, PEÑUELAS J. Potassium: A neglected nutrient in global change[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24: 261-275.
- [32] NIEDERBERGER J, KOHLER M, BAUHUS J. Distribution of phosphorus fractions with different plant availability in German forest soils and their relationship with common soil properties and foliar P contents[J]. *Soil*, 2019, 5: 189-204.
- [33] 朱教君, 康宏樟, 宋立宁, 等. 科尔沁沙地南缘樟子松人工林地地下水埋深季节变化[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1767-1772.
ZHU J J, KANG H Z, SONG L N, *et al.* Seasonal variation of groundwater table for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in southern Keerqin Sandy Land [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(9): 1767-1772.
- [34] 彭礼琼, 金则新, 王强. 模拟氮沉降对夏蜡梅幼苗生理生态特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(4): 989-995.
PENG L Q, JIN Z X, WANG Q. Effects of simulated nitrogen deposition on the eco-physiological characteristics of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 989-995.
- [35] 严正兵, 金南瑛, 韩廷申, 等. 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(6): 551-557.
YAN Z B, JIN N Y, HAN T S, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Arabidopsis thaliana* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(6): 551-557.
- [36] NIINEMETS Ü, KULL K. Co-limitation of plant primary productivity by nitrogen and phosphorus in a species-rich wooded meadow on calcareous soils[J]. *Acta Oecologica*, 2005, 28: 345-356.
- [37] MARSCHNER H, MARSCHNER P. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2012.