

荒漠植物红砂 (*Reaumuria soongorica*) 叶片元素 和水分含量与土壤因子的关系

马剑英^{1, 2, 3}, 陈发虎², 夏敦胜¹, 孙惠玲², 王 刚^{3, *}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 3. 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000)

摘要:通过测定中国境内荒漠植物红砂 (*Reaumuria soongorica*) 主要分布区 21 个自然种群 407 个植株叶片的氮(N)、磷(P)、钾(K)含量、有机质和叶片含水量, 以及不同种群内土壤含水量、可溶性盐分含量、有机质、全氮、全磷含量等土壤理化性状指标, 分析不同自然种群红砂叶片元素含量与土壤环境因子之间的关系。研究表明, 随着不同土壤层含水量的增加, 红砂叶片 N 含量和叶片含水量显著增加, 而叶片 K 含量显著降低。土壤养分含量、可溶性盐分含量与红砂叶片 P 含量显著正相关, 与叶片含水量显著负相关。随着土壤 pH 值的增加, 红砂叶片 N 含量显著下降, 叶片含水量显著增加。说明不同自然种群中红砂叶片养分含量受土壤状况的影响显著, 不同土壤理化性状指标对红砂叶片元素含量的贡献显著不同。土壤水分含量是生境中影响红砂叶片特征的最关键因子, 而红砂叶片含水量则最易受各种土壤理化性状的影响。生境中土壤含水量对红砂各种元素含量的影响和红砂叶片含水量对不同土壤条件的这种响应模式支持了红砂是一种以提高水分利用效率而适应于极端干旱生境的典型超旱生植物。

关键词:荒漠生态系统; 红砂 (*Reaumuria soongorica*); 叶片含水量; 叶片元素含量; 土壤条件

文章编号: 1000-0933(2008)03-0983-10 中图分类号: Q948.11 文献标识码: A

Relationships between soil factors and leaf element, water contents in desert plant *Reaumuria soongorica*

MA Jian-Ying^{1, 2, 3}, CHEN Fa-Hu², XIA Dun-Sheng¹, SUN Hui-Ling², WANG Gang^{3, *}

1 Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 MOE Key Laboratory of Western China's Environmental System, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3 School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 0983 ~ 0992.

Abstract: *Reaumuria soongorica* is a main dominant and constructive species of the desert shrubby vegetation in arid region. We tried to investigate the variations in foliar characteristics of this desert plant and identify the major factor which influences the variations in the major distribution areas. 21 populations were selected at altitudes 394—1987 m, latitudes

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40671195, 90502008); 中国博士后科学基金资助项目(20060390193); 科技部重点国际合作资助项目(2002CB714004)

收稿日期:2006-12-22; **修订日期:**2007-08-23

作者简介:马剑英(1972~), 女, 乌鲁木齐人, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区环境变化与植物生理生态学研究. E-mail: jyma@lzb.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jyma@lzb.ac.cn; wangg@lzu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40671195 and 90502008); the Postdoctoral Sciences Foundation of China (No. 20060390193) and the China International Collaboration Project (No. 2002CB714004).

Received date: 2006-12-22; **Accepted date:** 2007-08-23

Biography: MA Jian-Ying, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in environmental changes and plant ecophysiology in arid region. E-mail: jyma@lzb.ac.cn

36°10'—44°33'N and longitudes 81°43'—106°37'E. We measured nitrogen, phosphorus, potassium, organic and water contents in leaves of 407 individuals, and soil physicochemical properties including nitrogen, phosphorus, organic, water contents and total dissolved solids. Soil conditions had significant effects on foliar traits. Increased soil water content enhanced leaf nitrogen and leaf water contents in *R. soongorica*, and decreased leaf potassium content significantly. The soil nitrogen, phosphorus contents and total dissolved solids were positively correlated with leaf phosphorus, but negatively correlated with leaf water content. Leaf nitrogen content decreased and leaf water content increased significantly with increasing soil pH. We concluded that soil water content was the primary factor affecting foliar characteristics and that leaf water content was particularly influenced by environmental factors in different natural populations. Leaf water content in the desert plant *R. soongorica* respond to soil conditions reinforces that it is a super-xerophil improved water-use efficiency in this adaptive strategy to desert environment.

Key Words: desert ecosystem; *Reaumuria soongorica*; leaf water content; leaf element content; soil factors

在荒漠生态系统中,优势植物种类所组成的植物群落与生境是辩证的统一体,群落中一些优势植物的营养元素特征及化学成分反映了植物在一定生境下从土壤中吸收或累积的矿物成分养分的能力及代谢特征,土壤环境对植物吸收营养元素及植物代谢作用产生有重要影响,反过来,优势植物的生理生态特征在一定程度上能够反映生态系统的土壤环境状况,进而指示了该生态系统的健康状况及稳定程度^[1]。不同学者对不同地区从荒漠植物营养元素的季节动态、含量特征和动物营养等方面进行了较多研究^[2~5],但不同自然种群同一植物叶片元素含量特征及土壤状况对植物元素含量影响的研究较少。

红砂(*Reaumuria soongorica*)为超旱生小灌木,广泛分布于我国干旱荒漠地区,是荒漠灌丛植被主要优势种和建群种之一^[6]。其抗逆性强,生态可塑性大,具有很强的抗旱、耐盐和集沙能力^[7,8],对荒漠地区生态保护具重要作用。不同自然种群红砂叶片稳定碳同位素组成的空间分布特征、脯氨酸累积等及与环境因子之间的关系已有报道^[9~12],因此本文试图通过对不同自然种群下红砂叶片 N、P、K、有机质含量、含水量及其影响因子的分析,探究不同荒漠区环境条件和极端逆境条件对植物生理生态特性的影响,为荒漠植被优势物种的保护、恢复和重建提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究材料

所有样本 2003 年 7~8 月采自于中国境内以红砂为主要建群种的典型分布区,跨越东经 81°43'~106°37',北纬 36°10'~44°33',海拔 394~1987m。采样地尽可能地覆盖了红砂的主要分布区域,采样点示意图见图 1。选取 10 个不同地区,每个地区 2~3 个自然种群,在每一个种群中,间隔 20 m 以上分单株随机采集生长在开阔平坦环境下 15~30 个基本同龄的植株个体的幼叶,采后立即放入液氮中保鲜。同时每个种群分别采集深度为 0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm 的土壤样本,每个样本 3 个重复,带回实验室分析测定。

1.2 植物和土壤样品分析

植物全氮(N)测定用微量凯氏法;植物全磷(P)测定用($H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮)钼锑抗比色法;植物全钾(K)测定采用($H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮)火焰光度计法;植物有机质测定采用重铬酸钾容量法;植物含水量测定采用烘干称重法^[13]。

土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法;土壤全氮(N)测定凯氏定氮法;速效氮测定采用镉柱还原法;土壤全磷(P)测定采用($HClO_4-H_2SO_4$ 浸提)钼蓝比色法;速效磷测定采用(0.5mol/L $NaHCO_3$ 浸提)钼蓝比色法;pH 值用电位法测定;含水量测定用烘干称重法;土壤水溶性盐含量的测定采用残渣烘干法^[13]。

1.3 数据分析

利用 SPSS 13.0、Origin7.5 软件系统对实验数据进行统计分析和作图。

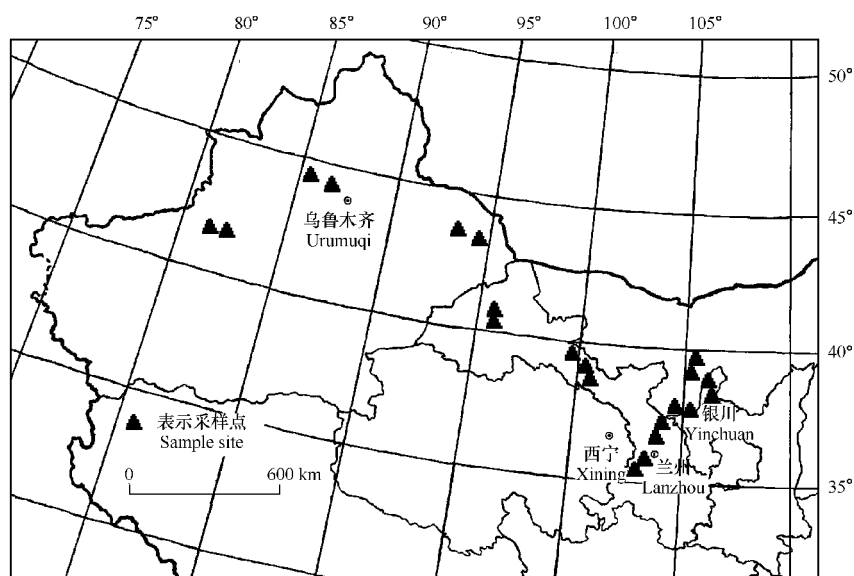


图1 采样点示意图

Fig. 1 Map of the study area in northwestern China (triangles indicate the sample site)

2 结果

2.1 土壤水分对红砂叶片 N、P、K、有机质含量和叶片含水量的影响

图2和图3为土壤不同深度含水量与红砂叶片 N、P、K、有机质含量和叶片含水量的关系。可以看出,土

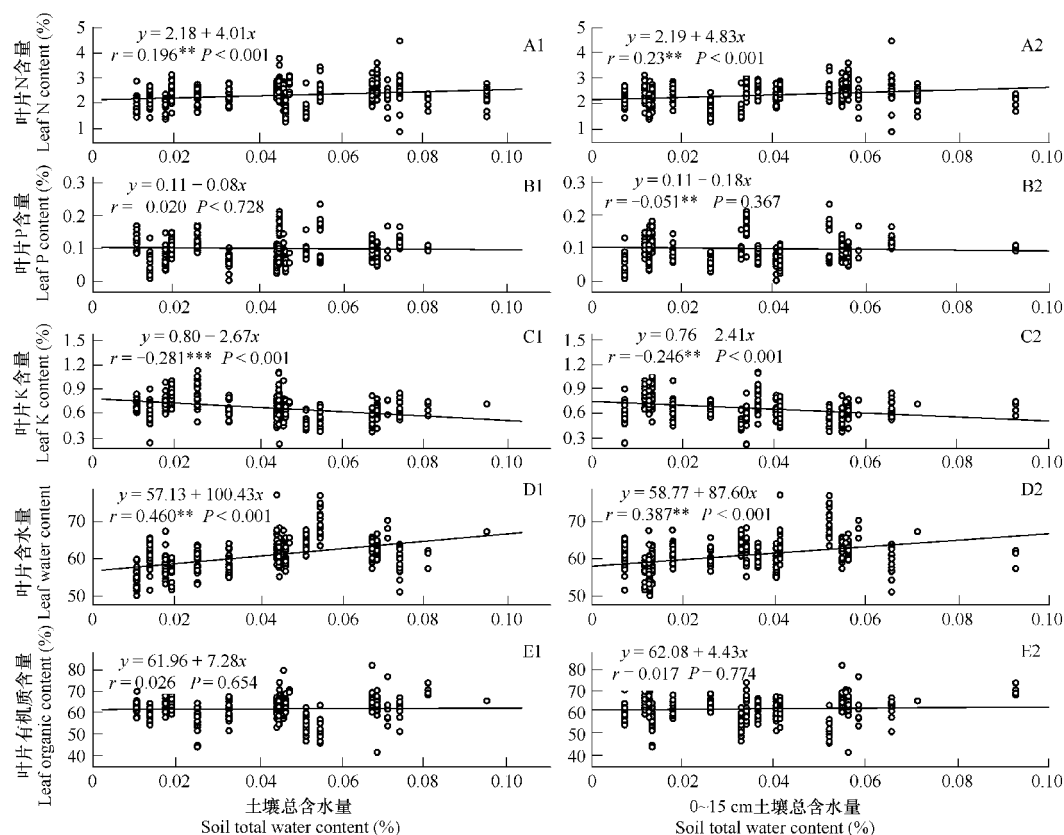


图2 红砂叶片 N、P、K、有机质含量、含水量与土壤总含水量、0~15 cm 层含水量之间的关系

Fig. 2 Relationships between foliar element, water contents of desert plant *R. soongorica* and soil total water content, soil water content in 0~15 cm

壤含水量对红砂叶片 N 含量的影响比较一致,叶片 N 含量与土壤总含水量(图 2A1)、0~15cm(图 2A2)、15~30cm(图 3A1)、30~45cm(图 3A2)层含水量显著正相关($P < 0.01$)。叶片 P 含量与土壤含水量的关系随土壤深度的不同而不同,随着土壤总含水量、0~15cm 和 15~30cm 层土壤含水量的增加,叶片 P 含量有微弱的降低趋势(图 2B1, B2; 图 3B1),但是却与土壤 30~45cm 层含水量显著正相关(图 3B2, $P = 0.029$)。说明红砂叶片 P 含量的积累与土壤总的水分条件关系不密切,而与更深层的土壤含水量有关。

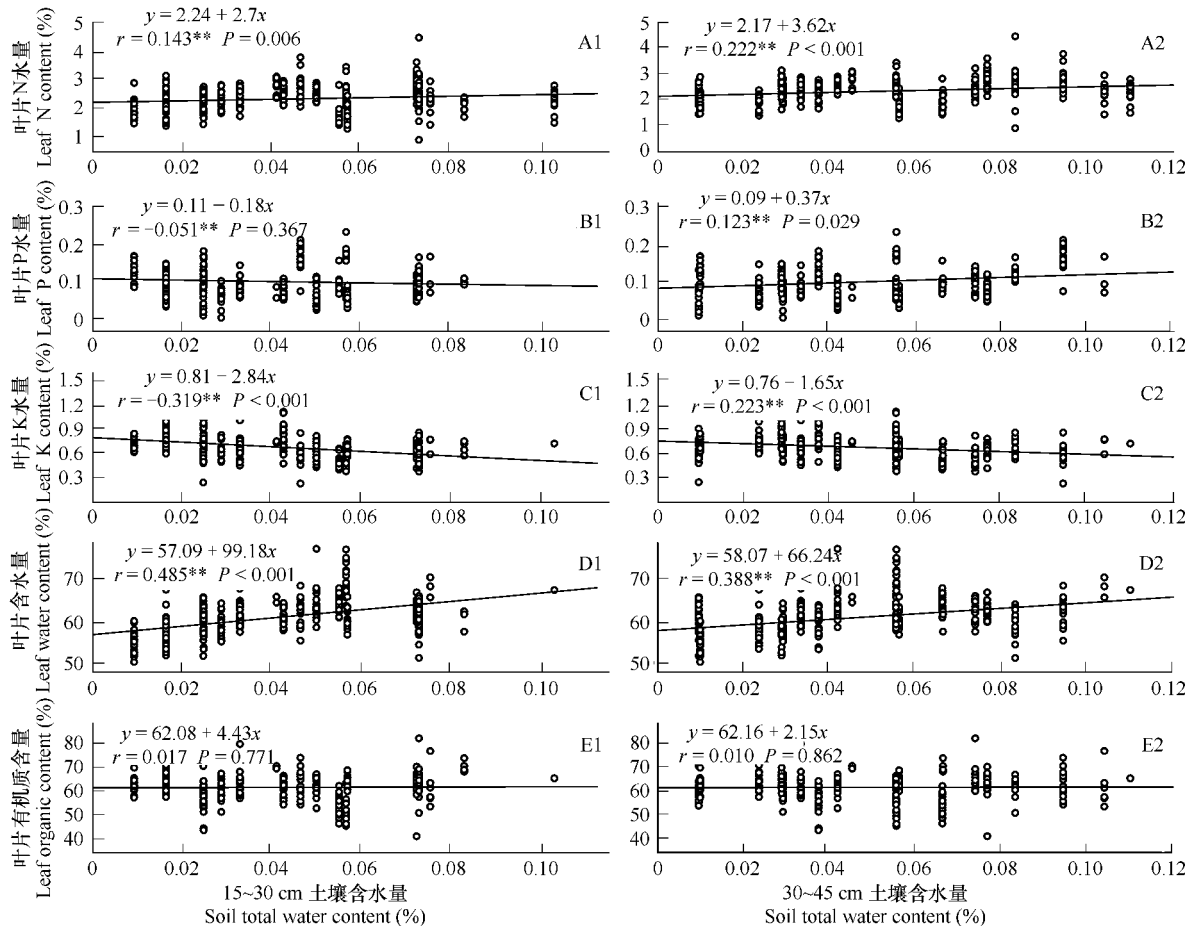


图3 红砂叶片 N、P、K、有机质含量、含水量与 15~30 cm、30~45 cm 层土壤含水量之间的关系

Fig. 3 Relationships between foliar element, water contents of *R. soongorica* and soil water content in 0~15 cm, 25~30 cm

不同深度土壤含水量对红砂叶片 K 含量影响显著,随着不同土壤层含水量的增加,红砂叶片 K 含量有显著降低的趋势(图 2C1, C2; 图 3C1, C2, $P < 0.001$)。红砂叶片含水量与不同土壤层含水量都显著正相关(图 2D1, D2; 图 3D1, D2, $P < 0.001$),随着不同土壤层含水量的增加,红砂叶片含水量也随之显著增大。一般而言,土壤水分越充足,植物叶片含水量也就越高。说明红砂生长地土壤水分状况的改善有利于红砂叶片保持较高的水分水平。土壤含水量与红砂叶片有机质含量无显著相关关系(图 2E1, E2; 图 3E1, E2, $P > 0.05$),说明红砂叶片有机质含量的积累不受土壤含水量变化的影响。

2.2 土壤养分对红砂叶片 N、P、K、有机质含量和叶片含水量的影响

从图 4 可以看出,土壤有机质含量仅对红砂叶片 P 含量和叶片含水量影响显著,与叶片 N、K、有机质含量无显著相关关系。随着土壤有机质含量的增加,红砂叶片 P 含量有显著上升的趋势(图 4B, $P = 0.002$),而红砂叶片含水量却随着土壤有机质的增加显著下降(图 4D, $P < 0.001$)。

土壤全 N 和速效 N 含量对红砂叶片 N、P、K、有机质含量和叶片含水量的影响如图 5 所示。可以看出,红砂生长地土壤的全 N 和速效 N 含量仅与红砂叶片 P 含量显著正相关(图 5B1, B2; $P < 0.001$),与红砂叶片含

水量显著负相关(图 5D1, D2; $P < 0.001$)。随着土壤速效 N 含量的增大,红砂叶片 K 含量有显著增加的趋势(图 5C2; $P = 0.004$)。而土壤全 N、速效 N 含量与红砂叶片 N 含量、有机质含量之间并无显著相关关系。说明土壤中 N 含量的变化与红砂叶片 N 含量的吸收并没有直接关系。

图 6 显示了土壤全 P 和速效 P 含量与红砂叶片各元素含量特征之间的关系。从图中可以看出,红砂叶片 N 含量与其生境中土壤全 P 含量显著正相关(图 6A1; $P < 0.001$),而与土壤速效 N 含量显著负相关(图 6A2; $P = 0.042$)。随着土壤全 P 和速效 P 含量的增加,红砂叶片 P 含量有显著上升的趋势(图 6B1, B2; $P < 0.001$),而叶片含水量则随着土壤全 P 和速效 P 含量的增加显著减少(图 6D1, D2; $P < 0.001$)。

整个分析结果认为,生境中土壤养分含量的变化主要对红砂叶片 P 含量和叶片含水量影响显著。土壤养分含量的增加能够促进红砂叶片 P 含量的增大,但是同时会抑制植物体本身从生境中进行水分的吸收。

2.3 土壤可溶性盐分含量和酸碱度对红砂叶片 N、P、K、有机质含量和叶片含水量的影响

不同生境中土壤盐碱度含量对红砂叶片元素含量特征的影响见图 7。可以看出土壤可溶性盐分含量与红砂叶片 P 含量和叶片 K 含量之间呈显著正相关关系(图 7B1, C1; $P < 0.001$),而与叶片含水量显著负相关(图 7D1; $P < 0.001$)。随着生境中土壤碱性程度的增加,红砂叶片 N 含量显著降低(图 7A1; $P = 0.001$),而叶片含水量却随之有显著增加的趋势(图 7D2; $P < 0.001$)。可以看出总体上土壤可溶性盐分含量和土壤 pH 值对红砂叶片 N、P、K 含量、叶片含水量和叶片有机质含量的影响呈相反趋势。

3 讨论

在植物营养物质中,氮(N)、磷(P)、钾(K)在植物体内含量较高,称为“大量元素”。N 是植物体内蛋白质的重要成分,也是核酸和蛋白酶、叶绿素、维生素及激素组成成分,许多研究表明 C_3 植物的光合作用与植物组成内的相对和绝对 N 含量密切相关^[14~16]。P 是植物体内许多重要有机化合物的组成成分,并在植物新陈代谢过程中起到重要作用。不但通过影响植物的渗透调节能力和保水力来增强植物组织的抗旱能力,而且能够通过提高植物体内可溶性糖和磷脂的含量增强植物的抗寒性。K 对调节植物细胞的水势和气孔运动有重要作用,能够促进植物光合作用和光合产物的运输、提高 CO_2 的同化率和酶活性。另外 K 在提高植物的抗旱、抗寒和抗盐等抗逆性方面也具有重要作用^[17~19]。因此植物必须吸收足够的 N、P、K 来维持自身的生长和发育。

植物体内的 N、P、K 主要由植物根系从土壤中吸收,除植物本身养分吸收特点外,生长环境中的土壤水分、土壤养分和土壤特征状况对植物吸收营养元素有很大的影响^[17]。

在干旱半干旱地区,水分是影响植物生长发育的主要限制因子,土壤水分决定着土壤、植被以及整个生态

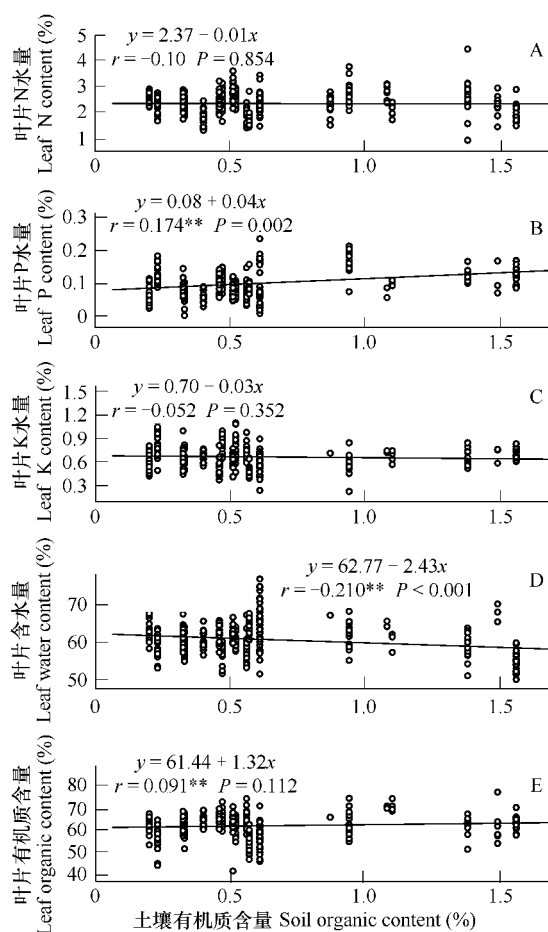


图 4 红砂叶片 N、P、K、有机质含量、含水量与土壤有机质含量之间的关系

Fig. 4 Relationships between foliar element, water contents of *R. soongorica* and soil organic content

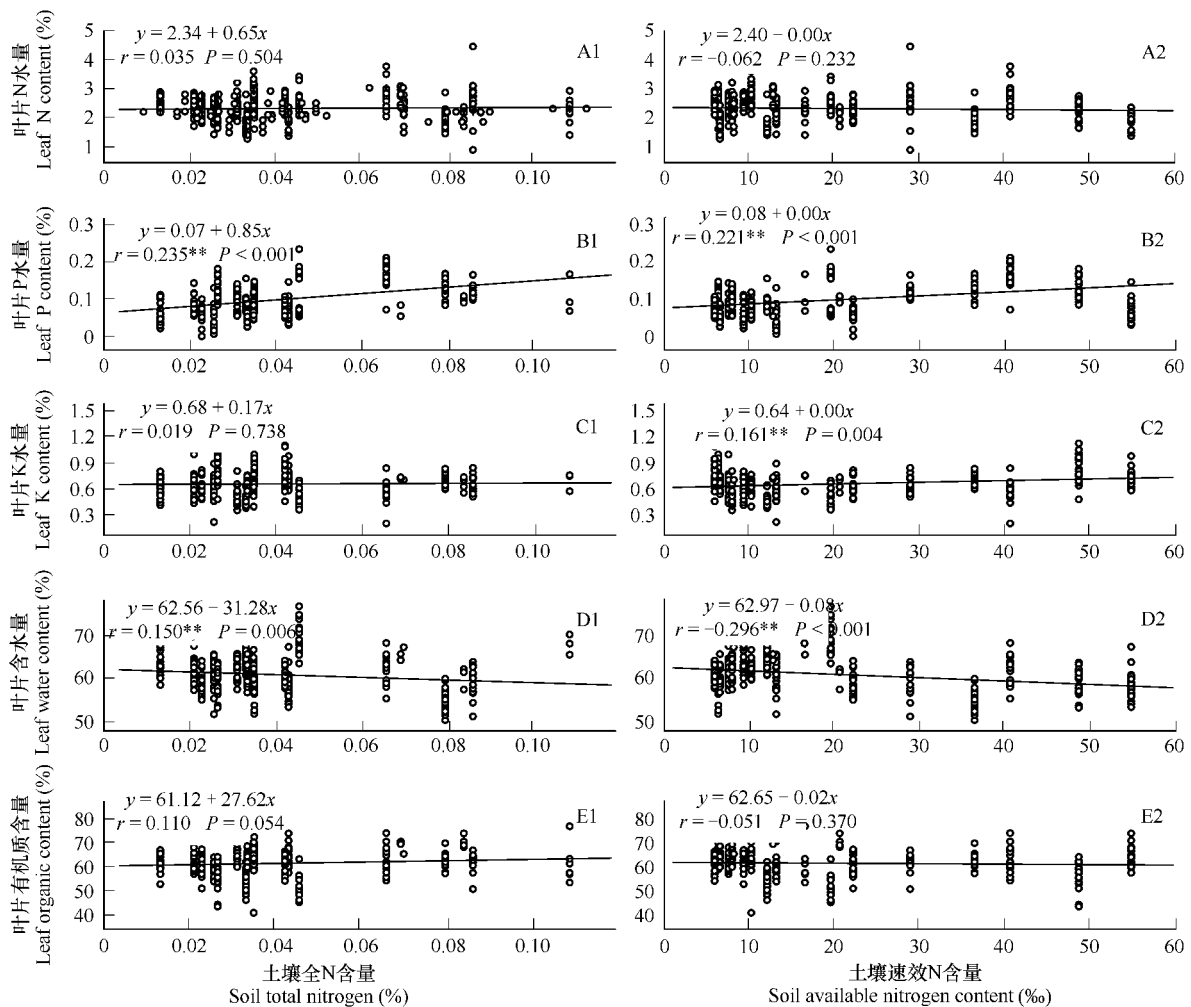


图5 红砂叶片 N、P、K、有机质含量、含水量与土壤全 N、速效 N 含量之间的关系

Fig. 5 Relationships between foliar element, water contents of *R. soongorica* and soil total nitrogen, available nitrogen content

系统的发生、发展和演化,是荒漠地区生态系统稳定、结构和功能正常发挥的关键因子,对整个生态系统的水热平衡起决定作用^[20]。植物营养元素等特征与植物特定的种类有关外,与生境土壤水分条件密切相关。

植物生长与不同土壤层含水量密切相关^[21]。赵良菊^①研究发现,油蒿叶片 N、K 含量和叶片含水量与不同土层土壤含水量显著正相关,叶片 P 含量则随土壤含水量的增加而降低,干旱条件下油蒿对 N、K 的吸收具有同步性。本文通过对土壤含水量和红砂叶片 N、P、K 等含量之间的相关分析,得出红砂生长区不同土壤层含水量与红砂叶片 N 含量、叶片含水量显著正相关,与叶片 K 含量显著负相关,而深层土壤含水量与红砂叶片 P 含量显著正相关的结果。因此可以看出土壤水分状况对植物的矿质元素含量有很大影响,植物叶片含水量随着土壤水分条件的改善而增加。两种研究结果表明红砂和油蒿叶片含水量与土壤含水量的变化同步,但土壤含水量的变化对红砂和油蒿两种植物叶片 P、K 含量的影响呈相反趋势,说明不同植物种类生境中的不同土层土壤含水量对植物生长的贡献不同,可能与各自不同的遗传学特征和生理生态学特征密切相关。

土壤是植物养分的来源,土壤养分(本研究中的土壤养分主要包括土壤全氮、速效氮、土壤全磷、速效磷和土壤有机质含量)是影响植物吸收营养元素的主要因素。土壤 N、P、K 是植物生长所必需的大量元素,土壤肥力的重要指标——土壤有机质能反映土壤肥力状况,影响着土壤的物理、化学和生物学特性。植物根系从

① 赵良菊. 沙坡头人工固沙区油蒿叶片特征与环境要素关系研究. 博士论文, 2006.

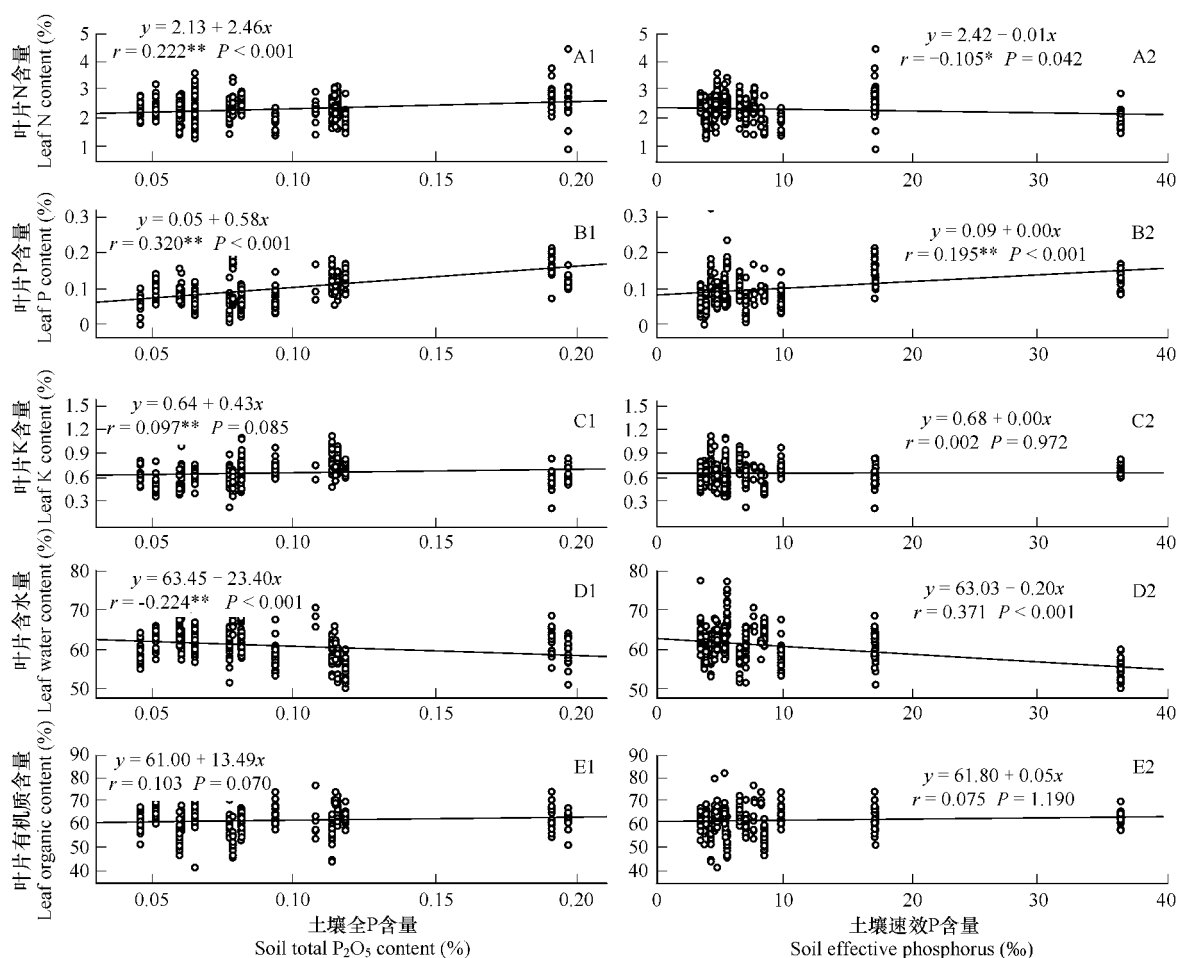


图6 红砂叶片N、P、K、有机质含量、含水量与土壤全P、速效P含量之间的关系

Fig. 6 Relationships between foliar element, water contents of *R. soongorica* and soil total phosphorus (P_2O_5), effective phosphorus

土壤溶液中吸收养分受土壤养分状况、土壤中有效养分浓度和土壤溶液中离子组成的影响,不同自然种群中植物叶片养分状况等特征可以反映其生长环境的营养状况^[17, 22]。

赵良菊对油蒿叶片养分含量与土壤养分关系的研究结果为,干旱年油蒿叶片养分含量随土壤P含量的增加而增加,而湿润年却呈相反的变化趋势,土壤养分含量与油蒿叶片含水量之间没有显著相关性。本研究结果发现,红砂生境中土壤有机质含量、土壤全N、速效N含量、土壤全P和速效P等土壤养分含量都与红砂叶片P含量显著正相关,而与红砂叶片含水量却显著负相关,土壤全P和速效P含量的增加能够促进红砂叶片N含量的增加,叶片K含量仅与土壤速效N含量有关。说明不同植物其叶片N、P、K含量和叶片含水量受环境土壤理化性状影响不同,可能是遗传因素和环境因素如土壤特性、胁迫条件以及其它因素共同作用的结果。由于植物中的P可以通过影响植株的渗透调节能力和保水力以及提高植物体内可溶性糖和磷脂的含量来增强植物的抗旱能力和抗寒性^[17],随着环境中土壤养分含量的增加,红砂叶片P含量增加,而叶片含水量却减少,这种变化趋势应该与红砂特殊的生理生态学特征有关。因为红砂植株低矮,叶肉质,角质层极厚,气孔数很少,表积极小且下陷很深,贮水组织发达;植物体内脯氨酸含量较高,水势很低,束缚水/自由水比值最高,保水力极强而蒸腾强度最低,具有典型的耐寒、耐旱特征^[6]。由于红砂多分布于干旱荒漠区,不仅气候极端干燥,而且土壤贫瘠,所以土壤养分的增加可能会抑制植物体本身从干旱胁迫的生境中进行水分的吸收。

红砂是典型泌盐植物,在我国分布地区多为生态脆弱地带,分布区土壤不仅水分极度匮乏,而且含盐量高,多为盐碱化土壤^[6-8]。因此分析生境中土壤盐碱度对红砂叶片N、P、K等含量的影响极为重要。

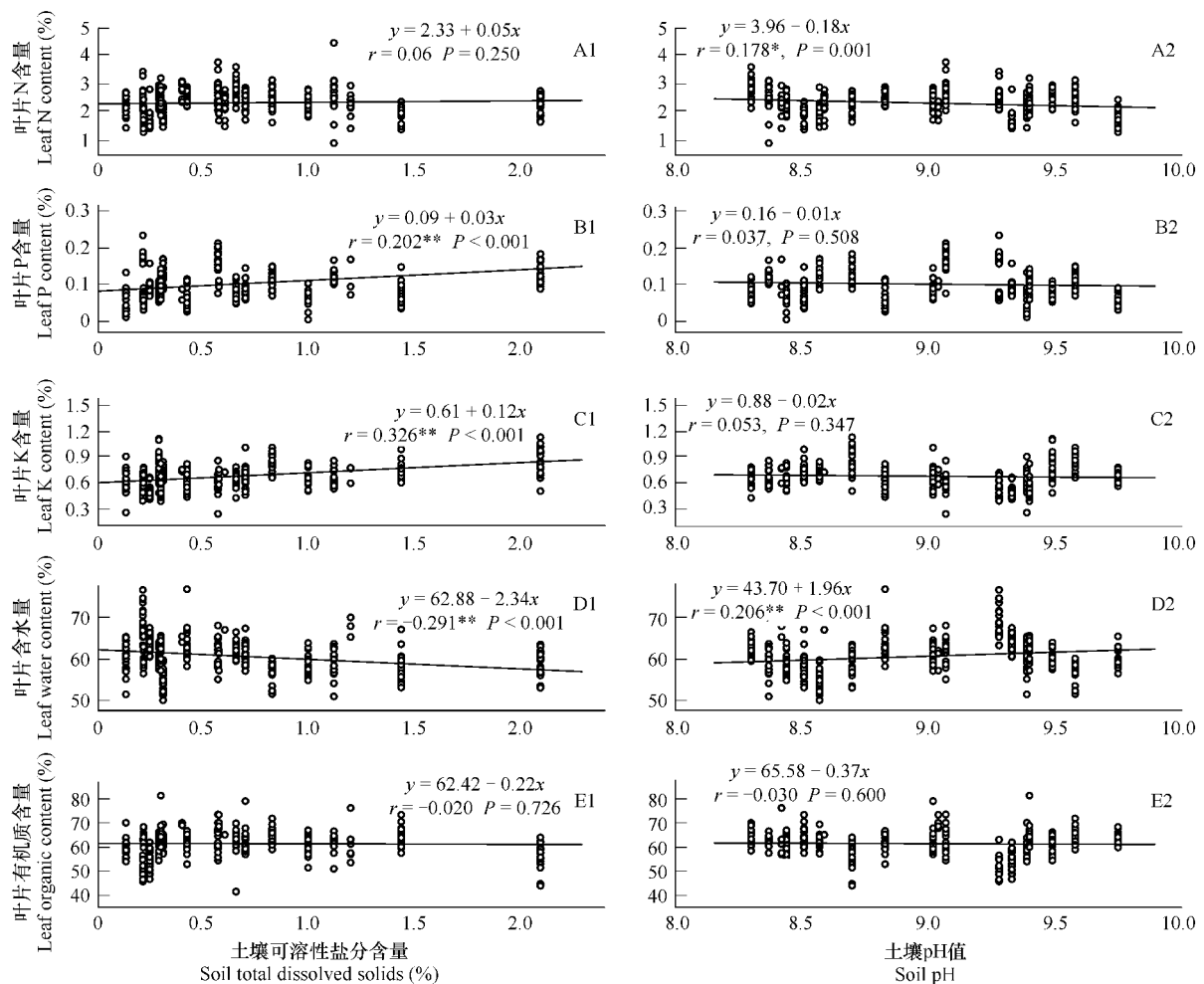


图7 红砂叶片 N、P、K、有机质含量、含水量与土壤可溶性盐分含量、土壤 pH 值之间的关系

Fig. 7 Relationships between foliar element, water contents of *R. songorica* and soil total dissolved solids, soil pH values

王孝安^[23]对荒漠植物群落和优势种的分布与环境关系研究中发现,红砂分布主要在低海拔、年降雨量少、土壤含盐量高的地段占优势。对红砂的研究多见于形态解剖学、植被演替和种群构件结构等方面^[24~27],而土壤盐分含量这个特殊土壤特征对红砂元素含量的影响研究还未见报道。本研究通过分析红砂生长区内土壤可溶性盐分含量和土壤 pH 值与红砂叶片元素特征之间的关系发现,土壤可溶性盐分含量与红砂叶片 P、K 含量显著正相关,与叶片含水量显著负相关;土壤 pH 值与红砂叶片 N 含量显著负相关,对叶片 P、K 和有机质含量无显著影响,随着土壤 pH 值的增大,红砂叶片含水量却随之显著增加。植物在盐分等胁迫下主要通过自身细胞的渗透调节表现对外界胁迫的适应,因为植物组织内 P 通过影响细胞的渗透调节能力来增强植物的抗旱能力,K 通过调节植物细胞的水势和气孔运动来提高植物的抗盐能力^[17]。因此红砂叶片 P、K 含量和含水量对生境中土壤可溶性盐分含量的这种反应可以说是在形态学适应的同时,其生理适应机制也发生了一定的改变。由于 C₃植物组织中 N 含量与其光合作用密切相关^[14],所以随着生境中土壤碱性化程度的增大,红砂光合作用能力会逐渐削弱。

总体而言,不同自然种群中红砂叶片元素含量受土壤状况的影响显著。土壤水分含量增大能够促进红砂叶片 N 含量和叶片含水量的增加,但同时可能会影响植物红砂从土壤中对 K 元素的有效吸收。而土壤酸碱度、土壤养分含量和土壤可溶性盐分含量主要只影响红砂叶片 P 含量以及叶片含水量的变化。说明土壤水分含量是生境中影响红砂 N、P、K 含量和叶片含水量的最关键因子,而红砂叶片含水量则最易受环境中不同土壤理化形状的影响。环境中土壤含水量对红砂各种元素含量的影响和红砂叶片含水量对不同土壤条件的这

种响应模式支持了红砂是一种以提高水分利用效率而适应于极端干旱生境的典型超旱生植物。

References:

- [1] Hou X Y. Vegetational plant geography and chemical element contents of dominant plant in China. Beijing: Science Press, 1982.
- [2] Kong L S, Wang Q B, Guo K. Characteristics and quantitative analysis of elements in plants in Alashan area, Nei Mongol. *Acta Botanica Sinica*, 43(5): 534—540.
- [3] Kong L S, Guo K, Wang Q B. The characteristics of element content of dominant species in South Junggar Desert, Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1202—1210.
- [4] Qu Y L. A comparative study on the contents of mineral elements in soil and herbage from two desert areas. *Acta Prataculturae Sinice*, 1999, 8(1): 69—72.
- [5] Wu C X, Zhou Z Y, Zhuang G H, *et al.* Aboveground nutrient content and its seasonal change in the strong xerophils. *Pratacultural Science*, 2004, 21(3): 30—34.
- [6] Liu J Q, Qiu M X, Pu J C, *et al.* The typical extreme xerophyte-*Reaumuria soongorica* in the desert of China. *Acta Botanica Sinica*, 1982, 24(5): 485—488.
- [7] Ma M H, Kong L S. The bio-ecological characteristics of *Reaumuria soongorica* on the border of oasis at Hutubi, Xijiang. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1998, 22(3): 237—244.
- [8] Huang P Y, Nie X P. Study on the habitat of *Reaumuria soongorica* Community. *Journal of Xinjiang University*, 1988, 5(3): 66—71.
- [9] Ma J Y, Chen F H, Xia D S, *et al.* Spatial distribution characteristics of stable carbon isotope compositions in desert plant *Rearmuria soongorica*. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 947—954.
- [10] Ma J Y, Chen T, Qiang W Y, *et al.* Correlations between foliar stable carbon isotope composition and environmental factors in desert plant *Rearmuria soongorica* (Pall.) Maxim. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(9): 1065—1073.
- [11] Ma J Y, Chen K, Xia D S, *et al.* Variation in foliar stable carbon isotope among populations of a desert plant, *Rearmuria soongorica* (Pall.) Maxim. in different environments. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69(3): 365—374.
- [12] Ma J Y, Zhou B C, Xia D S, *et al.* Relationships between environmental Factors and Chlorophyll, Proline Cumulation in Desert Plant *Rearmuria soongorica*. *Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica*, 2007, 27(4): 0769—0775.
- [13] Najing Agriculture University. *Agricultural Chemical Analysis of Soil*. Beijing: Agriculture Press, 1992.
- [14] Reich P B, Kloeppel B D, Ellsworth D S, *et al.* Different photosynthesis-nitrogen relations in deciduous hardwood and evergreen coniferous tree species. *Oecologia*, 1995, 104: 24—30.
- [15] Tognetti R, Peñuelas J. Nitrogen and carbon concentrations, and stable isotope ratios in Mediterranean shrubs growing in the proximity of a CO₂ spring. *Biologia Plantarum*, 2003, 46(3): 411—418.
- [16] Shi Z M, Cheng R M, Liu S R. Response of leaf $\delta^{13}\text{C}$ to altitudinal gradients and its mechanism. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2901—2906.
- [17] Beijing University. *Agricultural Chemistry (Pandect)*. Beijing: Agriculture Press, 1987.
- [18] Elumalai S, Bahieldinal A, Wraith J M, *et al.* Improved biomass productivity and water use efficiency under water deficit conditions in transgenic wheat constitutively expressing the barley *HVA1* gene. *Plant Science*, 2000, 155: 1—9.
- [19] Wang S M, Wan C G, Wang Y R, *et al.* The characteristics of Na⁺, K⁺ and free proline distribution in several drought resistant plants of the Alxa Desert, China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 56(3): 525—539.
- [20] Baird A J, Wilby R L. *Ecohydrology: Plants and water in terrestrial and aquatic environments*. London: Routledge, 1999.
- [21] Adams S N, Dickson D A, Cornforth I S. Some effects of soil water tables on the growth of *Sitka Spruce* in Northern Ireland. *Forestry*, 1972, 45(2): 129—133.
- [22] Mengel M, Kirkby E A. *Principles of plant nutrition*. 5th edn. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [23] Wang X A. Environmental relations with desert plant communities and distribution of dominants in Anxi. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(11): 1047—1052.
- [24] Liu J Q, Pu J C, Liu X M. Comparative studies on water relations and xeromorphic structures of some plant species in the middle part of the desert zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 1987, 29(6): 662—673.
- [25] Cui D F. Study on the taxonomy, distribution, ecology and morphological anatomy of the genus *Reaumuria* L. in China. *Arid Zone Research*, 1988, 50(1): 65—69.
- [26] Wang Y R, Zeng Y J, Fu H, *et al.* Affects of over grazing enclosure on desert vegetation succession of *Reaumuria soongorica*. *Journal of Desert*

Research, 2002, 22 (4): 321—327.

- [27] Xu L, Wang Y L, Wang X M, *et al.* Genetic structure of *Reaumuria soongorica* Population in Fukang Desert, Xinjiang and its relationship with ecological factors. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45 (7): 787—794.

参考文献:

- [1] 侯学煜. 中国植物地理及优势植物化学成分. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] 孔令韶, 王其兵, 郭柯. 内蒙古阿拉善地区植物元素含量特征及数量分析. *植物学报*, 2001, 43(5): 534~540.
- [3] 孔令韶, 郭柯, 王其兵. 新疆南准噶尔荒漠优势植物德化学成分含量特点. *生态学报*, 2002, 22(8): 1202~1210.
- [4] 曲亚玲. 两种荒漠土壤和牧草矿物元素的比较研究. *草业学报*, 1999, 8(1): 69~72.
- [5] 吴彩霞, 周志宇, 庄光辉, 等. 强旱生植物霸王和红砂地上部营养物质含量及其季节动态. *草业学报*, 2004, 21(3): 30~34.
- [6] 刘家琼, 邱明新, 蒲锦春, 等. 我国典型超旱生植物——红砂. *植物学报*, 1982, 24(5): 485~488.
- [7] 马茂华, 孔令韶. 新疆呼图壁绿洲外缘的琵琶柴生物生态学特性研究. *植物生态学报*, 1998, 22(3): 237~244.
- [8] 黄培祐, 聂湘萍. 准噶尔盆地中部琵琶柴群落的生境研究. *新疆大学学报*, 1988, 5(3): 66~71.
- [9] 马剑英, 陈发虎, 夏敦胜, 等. 荒漠植物红砂稳定碳同位素组成的空间分布特征. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 947~954.
- [12] 马剑英, 周邦才, 夏敦胜, 等. 荒漠植物红砂叶绿素和脯氨酸累积与环境因子的相关分析. *西北植物学报*, 2007, 27(4): 0769~0775.
- [13] 南京农业大学主编. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1992.
- [16] 史作民, 程瑞梅, 刘世荣. 高山植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的海拔响应及其机理. *生态学报*, 2004, 24(12): 2901~2906.
- [17] 北京大学主编. 农业化学(总论). 北京: 农业出版社, 1987.
- [23] 王孝安. 安西荒漠植物群落和优势种的分布与环境的关系. *植物学报*, 1998, 40(11): 1047~1052.
- [24] 刘家琼, 蒲锦春, 刘新民. 我国沙漠中部地区主要不同生态类型植物的水分关系和旱生结构比较研究. *植物学报*, 1987, 29(6): 662~673.
- [25] 崔大方. 中国琵琶柴属分类、分布、生态和形态解剖学的初步研究. *干旱区研究*, 1988, 50(1): 65~69.
- [26] 王彦荣, 曾彦军, 付华, 等. 过牧及封育对红砂荒漠植被演替的影响. *中国沙漠*, 2002, 22(4): 321~327.