

2 种生境下红砂枝系构型特征

海小伟, 李毅*, 谢燕飞 (甘肃农业大学林学院, 甘肃兰州 730070)

摘要 [目的]探究不同生境下红砂的枝系构型特征,并分析红砂植物构型对其生存的外在环境变异的适应策略。[方法]以荒漠地区超旱生小灌木红砂(*Reaumuria soongorica*)为研究对象,选择兰州九州台和张掖临泽2个样点,结合统计检验和分形理论的方法,通过分枝率、分枝长度、分枝角度、枝径比指标来研究2种生境下红砂的枝系构型变异特征。[结果]兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的总体分枝率和逐步分枝率差异均不显著,兰州九州台红砂总体分枝率略大于张掖临泽红砂,逐步分枝率呈现出兰州九州台红砂略小于张掖临泽红砂。兰州九州台红砂各级分枝枝长均显著长于张掖临泽红砂,且兰州九州台红砂和张掖临泽红砂枝条伸展能力从第1级到第4级呈相对减弱趋势。兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的分枝角度差异显著,总体上兰州九州台红砂各级分枝角度显著大于张掖临泽红砂,从1级到4级分枝角度呈明显减小趋势,角度均小于90°。兰州九州台红砂各级枝径比显著高于张掖临泽红砂,即兰州九州台红砂的承载力显著高于张掖临泽红砂。[结论]研究结果为深入了解红砂内部结构及其对环境的生态适应性提供了理论依据。

关键词 生境; 荒漠植物; 红砂; 枝系构型特征

中图分类号 S718.53 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)12-0001-04

Plant Architecture Characteristics of *Reaumuria soongorica* in Two Different Ecological Habits

HAI Xiao-wei, LI Yi*, XIE Yan-fei (College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract [Objective] The aim was to study plant architecture characteristics of *Reaumuria soongorica* in two different ecological habits, and analyze the adaptive strategy of plant architecture characteristics of *Reaumuria soongorica* to external environment variation. [Method] Taking the super-xerophobic shrub *Reaumuria soongorica* as research object, we selected two samples of Jiuzhoutai of Lanzhou City and Linze of Zhangye City. Based on the method of statistical test and fractal theory, we studied the branching variability of *Reaumuria soongorica* by branching rate, branch length, branching angle and branch diameter ratio index. [Result] There was no significant difference in the overall branching rate and gradual branching rate of *Reaumuria soongorica* between Jiuzhoutai of Lanzhou City and Linze of Zhangye City; the overall branch rate of *Reaumuria soongorica* in Jiuzhoutai of Lanzhou City was slightly larger than that of Linze of Zhangye City, and the gradual branching rate of *Reaumuria soongorica* in Jiuzhoutai of Lanzhou City was slightly less than that in Linze of Zhangye City. Jiuzhoutai of Lanzhou City *Reaumuria soongorica* at all levels of branching branches were significantly longer than Linze of Zhangye City *Reaumuria soongorica* red sand at all levels of branch length. Jiuzhoutai of Lanzhou City *Reaumuria soongorica* and Linze of Zhangye City *Reaumuria soongorica* branch stretching ability from the first level to the fourth level showed a relatively weakening trend. There were significant differences in the branching angle between Jiuzhoutai of Lanzhou City *Reaumuria soongorica* and Linze of Zhangye City *Reaumuria soongorica*. On the whole, Jiuzhoutai of Lanzhou City *Reaumuria soongorica* at all levels of branching angle was significantly greater than Linze of Zhangye City *Reaumuria soongorica* at all levels of branching angle. From 1 to 4 branch angle showed a significant reduction in the trend, the angle was less than 90°. Jiuzhoutai of Lanzhou City *Reaumuria soongorica* at all levels of branch diameter ratio was significantly higher than Linze of Zhangye City *Reaumuria soongorica* at all levels branch diameter ratio, that is, the carrying capacity of Jiuzhoutai of Lanzhou City *Reaumuria soongorica* was significantly higher than that of Linze of Zhangye City *Reaumuria soongorica*. [Conclusion] The results provide theoretical basis for understanding the internal structure of *Reaumuria soongorica* and the ecological adaptability to environment.

Key words Ecosystem; Desert plants; *Reaumuria soongorica*; Characteristics of branch architecture

生境指植物体或植物群落所居住的地方,是具体地段上对植物起作用的生态因子的总和,生境条件决定着这个地域所适合生长的植物种或植物群落^[1]。资源异质性是生境的基本属性。植物所需的光、水分、矿物质等资源在生境中的异质性分布增加了植物吸收和利用的难度^[2],还会引起植物在形态上表现出构型差异,而不同的构型特征又反映了植物对生境异质性的适应策略以及植物对光照、水分、养分等物质的竞争能力。

构型是树木的总体外貌特征,包括树形、冠形、分枝结构及树体组成部分(芽、枝、叶等)的空间分布格局、内在生物量构造组成及其配比结构和树体组成单位的数量动态变化等方面的内容,是植物内部遗传信息在一定时间内外部的形态表现^[3-4]。植物体自身的生长发育和适应环境的能力决定了植物构型,一定生长阶段的植株体构型也能影响植株的进一步发育和生长。荒漠植物构型是植物与环境相互作用、相

互适应的最终产物,其与功能的相互作用及互馈关系决定了荒漠植被的发展与演替。目前,荒漠植物构型研究主要是通过对构件研究揭示不同构件之间的相互作用、空间生物量分配以及不同植物在长期的进化过程中形成的生长模式,也从构件角度对植物进行比较分析,探讨植物不同的适应机制。红砂为超旱生小灌木,广泛分布于西北半干旱荒漠区,并且是这些自然分布带的建群种和优势种^[5]。其抗逆性强,生态可塑性大,具有很强的抗旱和集沙能力,对荒漠地区的生态保护具有重要作用^[6-7]。多年来,由于生态环境的变化以及人为活动的干扰,红砂的生存环境和发展受到了极大的影响,众多学者对红砂进行了较多研究,主要集中在水、盐胁迫下生理生态、种子的萌发和繁殖特性、生物学特征等方面^[8-19],但关于红砂枝系构型的研究较少。鉴于此,笔者研究了不同生境下红砂的枝系构型特征,并分析了红砂植物构型对其生存的外在环境变异的适应策略,旨在为深入了解红砂内部结构及其对环境的生态适应性提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况 试验区选择兰州九州台、张掖临泽2个以红砂为主要建群种的典型分布区作为样点。兰州九州台

基金项目 教育厅高等学校科研项目(2016A-026)。

作者简介 海小伟(1990—),男,甘肃华亭人,硕士研究生,研究方向:西北抗旱灌木。*通讯作者,教授,博士生导师,从事林木遗传育种教学及西北抗旱灌木种质资源收集保护研究。

收稿日期 2017-03-15

地理位置为 103°46' E, 36°08' N, 属北温带半干旱大陆性季风气候, 该区属典型的灰钙土, 建群种有红砂 (*Reaumuria soongorica*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、山桃 (*Prunus davidiana*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、柠条 (*Caragana korshinskii*) 等。张掖临泽地理位置为 100°05' E, 39°23' N, 该区属大陆性荒漠草原气候, 土壤为砂壤土, 以红砂、珍珠 (*Salsola passerina*) 等灌木为主要建群种。研究区生态环境概况见表 1。

表 1 研究区生态环境概况

Table 1 Overview of the ecological environment in the study area

样地 Sample area	海拔 Altitude m	年平均气温 Annual average temperature//℃	土壤 pH Soil pH	土壤含水量 Soil moisture content//%	年均降水量 Average annual precipitation//mm	年均蒸发量 Average annual evaporation//mm
兰州九州台 Jiuzhoutai of Lanzhou City	2 067	9.3	8.10	4.11	329.7	1 446.0
张掖临泽 Linze of Zhangye City	1 388	7.7	8.98	2.84	118.4	1 830.4

1.2 研究方法

1.2.1 红砂样株的选择。采用样线法, 在不同生境红砂典型分布区(兰州九州台、张掖临泽)上每隔 50 m 设 1 条样线, 样线长 200 m, 各分布区设 6 条, 共设置 12 条; 在每条样线上每隔 20 m 确定 1 个样点, 选择距离样点最近的天然红砂标准株作为观测样本; 共观测 60 株样本。标准株的选择标准: ①植株个体生长旺盛, 无人破坏, 没有病虫害和动物啃食; ②生长环境良好, 光照水分充足; ③植株与其他或同种之间留有一定的间距, 避免种内种间的竞争。

1.2.2 红砂构型研究。

1.2.2.1 枝序的确定。采用向心式法测量植株地上部分各个枝系构型指标。选择最外层第一小枝作为第 1 级分枝, 2 个 1 级分枝相遇定义为第 2 级分枝, 2 个 2 级分枝相遇定义为第 3 级分枝, 以此类推, 2 个相同级别分枝相遇, 取下级分枝作为枝级^[20]。

1.2.2.2 构型指标的测定。用精度 0.1 cm 的卷尺测取标准株的植株高度、冠幅和各级枝条的分枝长度, 用游标卡尺测取植株基径和各级分枝的枝径, 用量角器测量植株各级分枝角度。

1.2.2.3 构型指标的计算。

(1) 总体分枝率(OBR):

$$OBR = (N_t - N_s) / (N_t - N_1)$$

式中, $N_t = \sum N_i$, 表示所有枝级中的枝条总数; N_s 为第 4 级分枝枝条数; N_1 为第 1 级分枝的枝条数。

(2) 逐步分枝率(SBR):

$$SBR_{i+1} = N_i / N_{i+1}$$

式中, N_i 和 N_{i+1} 分别是第 i 和第 $i+1$ 级分枝的枝条总数。

(3) 枝径比(RBD):

$$RBD = D_{i+1} / D_i$$

式中, D_i 和 D_{i+1} 分别是第 i 和第 $i+1$ 级分枝的枝条直径(cm)。

1.2.3 环境因子监测。环境因子分别在兰州九州台、张掖临泽 2 个样地定点测定, 利用干湿湿度计测定温度和湿度。在标准株中选 3 株红砂下土壤取样, 各取 3 个 0~60 cm 样品, 作为测定土壤水分的样本。土壤含水量采用烘干(105℃)法测定。用干湿重法测量土壤含水量, 将所取新鲜土样装入铝盒内, 用保鲜膜密封带回实验室并立即称其鲜重 g_1 , 然后在 105℃烘箱中烘干并称其干重 g_2 , 土壤含水量计算公式: $M = (g_1 - g_2) / (g_2 - g_0) \times 100\%$, 式中 M 为土壤含水量, g_0 为铝盒的重量。

1.2.4 数据处理。试验所得数据用 Excel 进行整理和作图, 采用 SPSS 13.0 对试验数据进行统计分析, 同时对所获得的数据进行差异性检验。

2 结果与分析

2.1 红砂总体分枝率特征 由表 2 可知, 兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的总体分枝率均较低, 不同生境下红砂的总体分枝率差异性不显著, 兰州九州台红砂的总体分枝率为 0.51, 张掖临泽红砂为 0.47, 即兰州九州台红砂总体分枝率略大于张掖临泽红砂, 说明红砂对环境的适应性有所不同, 是植物对于空间资源合理利用的一种适应策略。

表 2 总体分枝率统计

Table 2 Overall branch rate statistics

类型 Types	N_t		N_1		OBR	
	平均值 Average	标准差 Standard Deviation	平均值 Average	标准差 Standard Deviation	平均值 Average	标准差 Standard Deviation
兰州九州台红砂 <i>Reaumuria soongorica</i> of Jiuzhoutai of Lanzhou City	2 718.66 a	1 754.31	5.53 a	1.88	0.51 a	0.23
张掖临泽红砂 <i>Reaumuria soongorica</i> of Linze of Zhangye City	997.20 b	812.01	5.80 a	2.21	0.47 a	0.19

注: 同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著

Note: Different small letters showed significant difference among treatments at 0.05 level

2.2 红砂逐步分枝率特征 由表 3 可知,兰州九州台红砂的 $SBR_{1;2}$ 值与 $SBR_{2;3}$ 和 $SBR_{3;4}$ 值分别为 0.18、0.16、0.26;张掖临泽红砂的 $SBR_{1;2}$ 值与 $SBR_{2;3}$ 和 $SBR_{3;4}$ 值分别为 0.19、0.19、0.32。逐步分枝率呈现兰州九州台红砂略小于张掖临泽红砂,与总体分枝率恰恰相反,说明兰州九州台红砂不同

枝级枝条的分枝能力强,而张掖临泽红砂不同枝级枝条的分枝能力较弱。从兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的逐步分枝率之间的差异可以分析原因是空间资源的限制作用和植物枝条间的竞争作用。

表 3 红砂在不同生境下的逐步分枝率特征

Table 3 Characteristics of gradual branching of *Reaumuria soongorica* in different habitats

类型 Types	$SBR_{1;2}$		$SBR_{2;3}$		$SBR_{3;4}$	
	平均值 Average	标准差 Standard deviation	平均值 Average	标准差 Standard deviation	平均值 Average	标准差 Standard deviation
兰州九州台红砂 <i>Reaumuria soongorica</i> of Jiuzhoutai of Lanzhou City	0.18 a	0.08	0.16 a	0.07	0.26 a	0.16
张掖临泽红砂 <i>Reaumuria soongorica</i> of Linze of Zhangye City	0.19 a	0.70	0.19 a	0.06	0.32 a	0.10

注:同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著

Note: Different small letters showed significant difference among treatments at 0.05 level

由于受空间资源的限制,兰州九州台红砂各级分枝能力略高于张掖临泽红砂。这是因为张掖临泽严酷的环境迫使红砂在生长发育初期尽可能地萌发出多的枝条,以便进行光合作用促进植物生长,但水分、养分的稀少又限制了下一枝级的数量。

2.3 分枝长度特征 由表 4 可知,兰州九州台红砂和张掖临泽红砂在长期进化过程中所处的环境条件差异使枝条伸

展能力存在明显的差异,兰州九州台红砂各级分枝枝长均显著长于张掖临泽红砂,而在整体外观上,兰州九州台红砂植株较张掖临泽红砂植株高大,说明不同生境红砂对环境的适应对策存在一定差异。兰州九州台红砂和张掖临泽红砂各级分枝枝长从第 1 级到第 4 级呈现相对减弱的趋势,说明随着每一级枝条向外伸展,其伸展能力呈现下降的趋势,而这是由每一级枝条的承载力决定的。

表 4 红砂分枝长度统计

Table 4 The branch length statistics table of *Reaumuria soongorica*

m

类型 Types	1 级分枝 Branch length at level 1		2 级分枝 Branch length at level 2		3 级分枝 Branch length at level 3		4 级分枝 Branch length at level 4	
	平均值 Average	标准差 Standard deviation						
兰州九州台红砂 <i>Reaumuria soongorica</i> of Jiuzhoutai of Lanzhou City	7.57 a	3.30	7.79 a	3.24	5.32 a	0.81	4.29 a	1.35
张掖临泽红砂 <i>Reaumuria soongorica</i> of Linze of Zhangye City	5.10 a	3.83	5.42 b	2.13	4.29 b	1.24	3.46 a	0.87

注:同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著

Note: Different small letters showed significant difference among treatments at 0.05 level

2.4 分枝角度特征 由表 5 可知,兰州九州台红砂和张掖临泽红砂在分枝角度上差异显著。兰州九州台红砂各级分枝角度显著大于张掖临泽红砂。对于张掖临泽红砂而言,由于所处环境对空间竞争相对较小,所以张掖临泽红砂各级分枝角度明显小于兰州九州台红砂。总体上,兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的分枝角度从 1 级到 4 级均有减小的趋势。

比较发现,兰州九州台红砂和张掖临泽红砂一般在越靠近植株顶端,年轻的枝和干之间的角度最小,而在越靠近植株基部的老枝和干之间的角度最大,说明红砂冠型结构的动态变化特征。随着枝条逐渐生长,体积和生物量也相应增加,受重力影响也增大,枝条逐渐下垂,即越靠近基部枝干间分枝角度越大,越靠顶端枝干间分枝角度越小,更进一步说明了红砂分枝表现型既是遗传作用又是环境适应的结果。

2.5 枝径比特征 由表 6 可知,兰州九州台红砂的 $RBD_{2;1}$ 为 0.68,张掖临泽红砂的 $RBD_{2;1}$ 为 0.49,兰州九州台红砂的 $RBD_{2;1}$ 显著大于张掖临泽红砂,说明从枝条直径上体现出红砂生长生境间的差异。与张掖临泽相比较,兰州九州台红砂生长的环境状况较好,其结果在枝条上就表现为枝条直径减小速度较慢,低枝级的枝条直径与上一级枝条直径间的差异显著。

随着枝级的逐渐升高,兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的 $RBD_{3;2}$ 分别为 0.68 和 0.51, $RBD_{4;3}$ 分别为 0.65 和 0.44,即兰州九州台红砂的承载力显著高于张掖临泽红砂。在这 2 种生境下,红砂的枝径比均表现出先增大、后减小的趋势。总体上,兰州九州台红砂各级枝径比均显著高于张掖临泽红砂,说明兰州九州台红砂枝条的承载力显著高于张掖临泽红砂。

表5 红砂分枝角度统计

Table 5 The branch angle statistics of *Reaumuria songorica*

类型 Types	1 级分枝 Branch angle at level 1		2 级分枝 Branch angle at level 2		3 级分枝 Branch angle at level 3		4 级分枝 Branch angle at level 4	
	平均值 Average	标准差 Standard Deviation	平均值 Average	标准差 Standard Deviation	平均值 Average	标准差 Standard Deviation	平均值 Average	标准差 Standard Deviation
兰州九州台红砂 <i>Reaumuria songorica</i> of Jiuzhoutai of Lanzhou City	51.70 a	9.68	48.96 a	8.39	44.16 a	6.09	43.70 a	9.82
张掖临泽红砂 <i>Reaumuria songorica</i> of Linze of Zhangye City	45.35 a	9.08	31.47 b	7.80	30.77 b	13.20	30.56 b	13.17

注:同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著

Note: Different small letters showed significant difference among treatments at 0.05 level

表6 不同生境下红砂枝径比

Table 6 Ratio of *Reaumuria songorica* to branch diameter in different habitats

类型 Types	RBD _{2:1}		RBD _{3:2}		RBD _{4:3}	
	平均值 Average	标准差 Standard Deviation	平均值 Average	标准差 Standard Deviation	平均值 Average	标准差 Standard Deviation
兰州九州台红砂 <i>Reaumuria songorica</i> of Jiuzhoutai of Lanzhou City	0.68 a	0.16	0.68 a	0.16	0.65 a	0.17
张掖临泽红砂 <i>Reaumuria songorica</i> of Linze of Zhangye City	0.49 b	0.07	0.51 b	0.20	0.44 b	0.20

注:同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著

Note: Different small letters showed significant difference among treatments at 0.05 level

3 结论与讨论

分枝率表示枝条产生分枝的能力,大部分的构型研究中,分枝率都被作为一个重要指标,也是一个最具有争议的指标。一部分研究认为分枝率具有物种、个体和枝条 3 个层次上的稳定性;另一部分研究认为分枝率是一个敏感参数,在不同的立地条件、不同的演替阶段,分枝率具有很大的差异,因而能更好地反映构型的可塑性变化。

该研究对兰州九州台红砂和张掖临泽红砂分别从总体分枝率(OBR)和逐步分枝率(SBR)2 个层次进行了研究,结果表明总体分枝率在在一定程度上可以体现兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的差异,而逐步分枝率可以体现兰州九州台和张掖临泽红砂的分枝能力。兰州九州台的总体分枝率略大于张掖临泽红砂,差异不显著。总体上兰州九州台红砂逐步分枝率略小于张掖临泽红砂,差异不显著。兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的总体分枝率较低,分别为(0.51 ± 0.23)和(0.47 ± 0.19)。

兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的 1~4 级分枝长度存在显著差异,从第 1 级到第 4 级分枝长度均是兰州九州台大于张掖临泽,且兰州九州台和张掖临泽红砂的伸展能力呈现相对减弱的趋势。

兰州九州台红砂和张掖临泽红砂的分枝角度差异显著,总体上,兰州九州台红砂分支角度大于张掖临泽红砂分枝角度。从 1 级到 4 级分枝角度均有减小的趋势,角度均小于 90°。

兰州九州台红砂和张掖临泽红砂 RBD_{2:1}、RBD_{3:2} 和 RBD_{4:3} 分别为 0.68、0.68、0.65 和 0.49、0.51、0.44。总体上,兰州九州台红砂各级枝径比均显著高于张掖临泽红砂。

荒漠植物构型是植物与环境相互作用、相互适应的最终产物,受多方面的影响。该研究只是从分枝角度、分枝长度、枝径比、逐步分枝率等指标对荒漠植物构型进行了初步探讨,缺少系统的荒漠植物构型的指标体系,还有待于进一步研究和补充。

参考文献

- [1] 冷平生. 园林生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 11-135.
- [2] 梁士楚, 张淑敏, 于飞海, 等. 绢毛葡萄委陵菜与土壤有效磷的小尺度空间相关分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(4): 613-618.
- [3] 王丽娟, 孙栋元, 赵成义, 等. 准噶尔盆地梭梭、白梭梭植物构型特征[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4952-4960.
- [4] 郭春秀, 袁宏波, 徐先英, 等. 石羊河下游 7 种沙生灌木的构型比较[J]. 西北植物学报, 2015, 35(5): 1031-1036.
- [5] 刘家琼, 邱明新, 蒲锦春, 等. 我国荒漠典型超旱生植物: 红砂[J]. Journal of integrative plant biology, 1982(5): 485-488.
- [6] 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[J]. 植物生态学报, 1998, 22(3): 237-244.
- [7] 黄培祐, 聂湘萍, 周建民, 等. 准噶尔盆地中部琵琶柴(*Reaumuria songorica*) 群落的生境研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 1988, 5(3): 66-71.
- [8] 种培芳, 李航逸, 李毅. 荒漠植物红砂根系对干旱胁迫的生理响应[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 72-80.
- [9] 赵昕, 杨小菊, 石勇, 等. 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的根茎叶中离子吸收与分配特征[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 963-972.
- [10] 单立山, 李毅, 段雅楠, 等. 红砂幼苗根系形态特征和水分利用效率对土壤水分变化的响应[J]. 西北植物学报, 2014, 34(6): 1198-1205.
- [11] 耿东梅, 单立山, 李毅. 土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物学报, 2014, 49(3): 282-291.
- [12] 孙书存, 陈灵芝. 不同生境中辽东栎的构型差异[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 358-364.
- [13] 种培芳, 苏世平, 李毅. 4 个地理种群红砂的抗旱性综合评价[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 26-33.
- [14] 陈金贤, 王有科. 兰州九州台侧柏生长与适宜地形条件的关系[J]. 科技致富向导, 2015(5): 8-9.
- [15] 贾海娟, 李毅, 杨彩红, 等. 6 个种源红砂幼苗主要水分参数与抗旱性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(8): 182-187.

(下转第 11 页)

样品经碳酸钠-氧化锌混合试剂烧结热水提取后的溶液呈弱碱性,含有大量的 CO₂ 气体,显色前应赶出。上述选定的硝酸溶液以及硫酸高铁铵溶液中含有的硝酸量相当于

1.2 mL 浓硝酸。硫酸高铁铵在酸性介质中有较大的溶解度,该研究配制硫酸高铁铵溶液时选择其介质为 25% 硝酸。因此,该试验选择加入 4% 稀硝酸溶液 5.0 mL 用于调节酸度。

表 2 试剂用量与放置时间正交试验设计和结果

Table 2 Tested orthogonal design and result of colorimetric reagent dosage and coloration time

试验号 No.	硫氰酸汞(A) Mercury thiocyanate mL	硫酸高铁铵(B) Ammonium ferric sulfate//mL	硝酸(C) Nitric acid//mL	放置时间(D) Storage time//min	A - A ₀
1	1.0	3.0	1.0	20	0.239
2	1.0	4.0	2.0	30	0.287
3	1.0	5.0	3.0	40	0.309
4	1.5	3.0	2.0	40	0.298
5	1.5	4.0	3.0	20	0.335
6	1.5	5.0	1.0	30	0.333
7	2.0	3.0	3.0	30	0.310
8	2.0	4.0	1.0	40	0.342
9	2.0	5.0	2.0	20	0.339
k ₁	0.278	0.282	0.305	0.304	
k ₂	0.322	0.321	0.308	0.310	
k ₃	0.330	0.327	0.318	0.316	
R	0.467	0.402	0.121	0.107	

2.3 方法检出限 同时测定空白样品 12 份,以 3 倍标准偏差计算,氯的检出限为 6.0 μg/g。

2.4 方法精密度与准确度 按上述试验条件对国家一级标准物质重复测定 12 次,测定结果见表 3。由表 3 可知,方法相对标准偏差 RSD 小于 6.00%,RE < 2.00%,测定结果与标准推荐值一致。

表 3 方法的精密度与准确度

Table 3 Precision and accuracy of method

标准物质 Standard material	平均值 Average value//μg/g	标准值 Standard value//μg/g	S	RSD %	RE %
GSB-1	395	400	9.6	2.42	1.27
GSB-2	854	860	8.4	0.98	0.70
GSB-3	494	500	8.4	1.70	1.21
GSB-4	80	80	4.3	5.40	0.63
GSB-5	6 320	6 360	88.9	1.41	0.63
GSB-6	434	440	9.7	2.24	1.30

3 结论

该研究应用焙烧富集分离-分光光度法测定了植物样品中氯含量,并通过程序升温的方式焙烧样品,该方法简单快速,测定结果稳定可靠,适合大批量植物样品中氯含量的测定。

参考文献

[1] 余小林,陈仁勇,陈园园,等. 高效阴离子交换色谱-脉冲安培检测模拟海水中痕量溴和碘离子[J]. 现代科学仪器,2010(6):139-140.

[2] 牟世芬,刘克纳,丁晓静. 离子色谱方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2000.

[3] 郭莹莹,叶明立,施青红,等. 离子色谱-抑制电导法分别测定海水中阴离子和阳离子[J]. 理化检验-化学分册,2006,42(3):185-188.

[4] 钱立群,刘宁英,陈春兰,等. 饮用水中 5 种阴离子的离子色谱测定法[J]. 环境与健康杂志,2006,23(5):456-458.

[5] 林华影,盛丽娜,李一丹,等. 离子色谱法测定生活饮用水中 12 种无机阴离子[J]. 中国卫生检验杂志,2009,19(10):2289-2290.

[6] ASTM. Standard test method for anions in water by chemically suppressed ion chromatography;D4327-03[S]. [s.l.]:[s.n.],1997.

[7] 施沈一,赵新华. 紫外分光光度法测定离子液体中卤离子含量[J]. 化学试剂,2010,32(5):427-430.

[8] 陈玉锋,庄志萍,左明辉. 氯胺 T 氧化-酚红分光光度法测定含碘卤水中溴[J]. 理化检验-化学分册,2012,48(4):477-478.

[9] 唐仕明,于剑峰,袁存光. 双波长分光光度法测定卤水中溴离子[J]. 盐业与化工,2012,41(7):19-21.

[10] 谢玉艳,施先义,韦文业. 紫外分光光度法测定食盐中微量碘[J]. 中国调味品,2014(4):116-118.

[11] 李卫东,徐署东,赵立胜. 硫氰酸铁-亚硝酸盐催化分光光度法测定水中碘[J]. 安徽预防医学杂志,2014(4):241-244.

[12] 程素敏,王娟,张岩,等. 分光光度法测定土壤中碘的方法改进[J]. 中国无机分析化学,2015,5(4):41-43.

[13] 郁陵庄,王争光,李梦龙. 钴-氯-二甲基乙酰胺体系直接分光光度法测定氯离子[J]. 分析化学,1996(6):739.

[14] 李月生,夏祥翔,李新怀,等. 饱和硫酸铁氨-硫氰酸汞分光光度法测定氯气吸附剂中的氯离子含量[J]. 分析实验室,2007,26(Z1):140-143.

(上接第 4 页)

[16] 段桂芳,单立山,李毅,等. 甘肃中西部地区红砂种群结构及空间格局特征[J]. 水土保持研究,2016,23(1):67-74.

[17] 周资行,李真,焦健,等. 腾格里沙漠南缘唐古特白刺克隆分株生长格局及根系构型分析[J]. 草业学报,2014,23(1):12-21.

[18] 潘佳,李荣,胡小文. 水分条件对红砂叶片碳同位素组成与光合特性和分枝生长的影响[J]. 西北植物学报,2016,36(6):1190-1198.

[19] 徐莉,王丽,岳明,等. 新疆阜康荒漠红砂种群构件结构与环境因子的灰色关联度分析[J]. 植物生态学报,2003,27(6):742-748.

[20] 宋于洋. 梭梭构件格局的环境变异[J]. 西北林学院学报,2008,23(6):60-65.