

半干旱地区不同年代冬小麦品种根系生长和水分利用效率对种植密度的响应

燕晓娟¹, 张岁岐^{1,2}, 王宗仁³, 孙婴婴¹

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西宝鸡市岐山县祝家庄农技站, 陕西 岐山 712000)

摘 要: 优良的品种与科学合理的种植密度是提高小麦产量的基础。试验以 3 个不同年代在黄土高原半干旱地区大面积推广的冬小麦品种为试验材料, 设置了 3 个种植密度(100 万株/hm²、250 万株/hm²、350 万株/hm²), 通过田间小区实验研究了种植密度对其根系生长, 产量及其水分利用效率的影响。结果表明: 不同年代冬小麦品种的根系生长, 水分利用效率及其产量对种植密度的响应不同。1960s 品种(丰产 3 号)的根系生长、产量及水分利用效率随种植密度的增加而降低; 1980s 品种(小偃 6 号)在中密度时根系生长, 产量及水分利用效率最大, 低密度次之, 高密度最小; 现代品种(长旱 58)根系生长, 产量及水分利用效率随种植密度的增加而提高。在本实验条件下, 现代品种较前品种的最高水分利用效率和最高产量均显著增加, 而相应的根重密度和根长密度却显著降低。这表明在黄土高原半干旱地区小麦品种更替过程中, 小麦的根系生长可能存在对其产量和水分利用效率不利的冗余, 只不过这种根系生长的冗余随品种的更替而降低, 并因此提高了其水分利用效率和产量。

关键词: 冬小麦; 根系; 水分利用效率; 种植密度

中图分类号: Q945.79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0032-05

Responses of Root Growth and Water Use Efficiency to Planting Density for Winter Wheat Varieties from Different Eras in Semi-arid Region

YAN Xiao-juan¹, ZHANG Sui-qi^{1,2}, WANG Zong-ren³, SUN Ying-ying¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 3. Zhujia Zhuang Agrotechnical Station of Qishan County, Shaanxi Province, Qishan, Shaanxi, 712000, China)

Abstract: Fine cultivar and suitable planting density are fundamentals for improving wheat yield. We tried to determine the influence of the planting density on the growth of root system, water use efficiency (WUE) and yields for winter wheat varieties from different eras in semi-arid region. Three cultivars introduced between 1960s and 2000s in the Loess Plateau were grown at three different planting density (100×10^4 plants/hm², 250×10^4 plants/hm² and 350×10^4 plants/hm²) in the field. The results showed that the yields and WUE reduced along with the increase of planting density for the variety Fengchan3 in 1960s.; the yields and WUE were the highest at middle density for the variety-Xiaoyan6 in 1980s, followed by low density, and with the lowest at the maximum density; and the yields and WUE steadily increased along with the increase of planting density for the variety-Changhan58 in 2000s. We also found that the maximum yields and WUE of morden cultivar increased, but both root weight density and root length density reduced accordingly. Our findings suggest that there exists root redundancy, which is adverse for increasing yields and WUE in winter wheat in the Loess Plateau. However, this kind of redundancy reduced with varietal replacement and thus promotes the yields and WUE.

Key words: winter wheat; root system; water use efficiency (WUE); planting density

收稿日期: 2013-04-10

修回日期: 2013-05-06

资助项目: 国家高技术研究(863)发展计划项目(2011AA100504); 高等学校学科创新引智计划资助(B12007)

作者简介: 燕晓娟(1980—), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事植物水分生理生态研究。E-mail: popedox1@163.com

通信作者: 张岁岐(1966—), 男, 陕西岐山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植物水分生理生态研究。E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

在半干旱地区,水资源不足是小麦产量提升的主要限制因子。通过提高小麦自身的水分利用效率以提高其生产潜力一直是小麦育种和栽培学家所共同关注的课题^[1]。品种更替对于小麦产量的提升具有重要作用,研究认为品种对提高产量的贡献率达 40%以上^[2-3]。在水肥充裕地区小麦品种更替中显著的变化是植株高度降低,收获指数增加^[4]。但是,在干旱地区和半干旱地区,矮秆化育种却未能获得显著效果^[5]。Siddique 等^[6]对澳大利亚近 100 a 选育出来的 9 个典型小麦品种的研究发现,现代品种同老品种相比,水分利用效率显著提高,其原因在于 0—40 cm 土层中老品种的根系较大。张岁岐等^[7]研究发现小麦从 2n→4n→6n 进化的过程中,整株水平上的水分利用效率与小麦的根干重、根长和根冠比均成显著线性负相关关系。张荣等^[8]研究发现在半干旱地区小根系的现代小麦品种较大根系的老品种水分竞争力弱,水分利用效率提高,从而促进了产量的提升。李话等^[9]以 6 个半干旱地区不同春小麦品种为材料的研究证明,黄土高原半干旱地区春小麦在品种更替过程中根长和根条数逐渐降低。因此,在半干旱地区小麦品种更替中其显著的变化可能是根系变小,促进了水分利用效率的提高,进而提高产量。

作物生产是一个群体过程,种植密度和群体数量、光能利用等密切相关,是影响小麦产量和水分利

用效率的重要因子之一^[10-13]。各品种小麦在一定条件下都有其适宜的种植密度,过高过低都不可能得到高产。因此探讨种植密度对于小麦根系生长、产量和水分利用效率的影响,对于合理利用自然资源、指导半干旱地区小麦品种改良和生产实践具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于中国科学院水利部水土保持研究所所长武生态农业试验站进行。试验站位于黄土高原中南部陕甘交界处的陕西省长武县洪家镇王东村(107°40′30″E,35°12′30″N),海拔 1 200 m,属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,光照充足,昼夜温差较大;年均降水量 584.1 mm,且多集中于 7—9 月份;2011 年 9 月—2012 年 6 月小麦生育期内降雨量为 292.4 mm,具体分布见表 1。地下水埋深 50~80 m,田间持水量年均值在 20%左右,属典型的旱作农业区;地貌属高原沟壑区,塬面和沟壑两大地貌单元各占 35%和 65%;地带性土壤为黑垆土,土体结构均匀疏松,0—200 cm 土壤容重均值为 1.40 g/cm³;土壤有机质含量为 11.58 g/kg,全氮 0.80 g/kg,碱解氮 52.45 mg/kg,全磷 0.679 g/kg,速效磷 11.14 mg/kg,速效钾 154.88 mg/kg,是黄土高原沟壑区典型性土壤。

表 1 2011 年 9 月—2012 年 6 月小麦生育期内降雨量分布

时间(年-月)	2011-09	2011-10	2011-11	2011-12	2012-01	2012-2	2012-03	2012-4	2012-05	2012-06
降雨量/mm	10.2	42.8	72.4	3.0	9.2	0.6	15.6	33.0	49.8	55.8

1.2 试验方法

1.2.1 试验材料 试验选用自 20 世纪 60 年代开始在黄土高原半干旱地区大面积推广种植的冬小麦品种,约每隔 20 a 选择 1 个代表品种,1960s 品种:丰产 3 号,1980s 品种:小偃 6 号,现代品种:长旱 58。

1.2.2 试验设计 于 2011 年 9 月 26 日种植,2012 年 6 月 28 日收获。每个试验小区面积为 2.8 m×4 m,播前施基肥:P₂O₅ 120 kg/hm²,N 150 kg/hm²。由于供试的 3 个品种适宜种植密度在 200~300 万株/hm²之间,据此设置了 3 个种植密度,分别为 100 万株/hm²、250 万株/hm²、350 万株/hm²,每个密度设 3 个重复,共计 27 个试验小区。试验小区随机区组排列,所有小区的行距均为 20 cm。

1.2.3 测定项目及方法

(1) 产量的测定。小麦成熟时,在每个试验小区中央选取 1 m²收割,风干后脱粒计产。

(2) 根系生物量的测定。小麦收获期,用直径 6 cm 的根钻在每个小区的行间、株间和株上三点垂直

取样,每 10 cm 取一个样品,共取 2 m 深,每钻共 20 个样品,每个小区共计 3 钻 60 个样品,采取冲洗和手工挑拣的方法取出根系,采用根系分析软件 Win-RHIZO 进行分析,从而获得各处理不同土层的根长,每个小区三钻根长总和的平均值即为该小区根长的特征参数。再将根系在 80℃下烘至恒重,用万分之一天平称其干重,计算每个小区 3 钻根系干重总和值,三钻平均值即为该小区的根干重特征参数。

(3) 水分利用效率(WUE)的测定。

$$WUE=Y/ET \tag{1}$$

式中:Y——小麦籽粒产量(kg/hm²);ET——田间耗水量(mm)。

田间耗水量(mm)的测定:

不同处理小区耗水量由水量平衡公式计算:

$$ET=R-F\pm Q+\Delta W \tag{2}$$

式中:ET——作物蒸发蒸腾量(mm);R——降水量(mm),小麦生育期内降水为 292.4 mm;F——地表径流(mm);Q——下界面渗漏量(mm);考虑到试验

期间无地表径流发生,此处取 $F=0, Q=0$; ΔW 为土壤贮水量的减少量(mm),用土钻法测得质量含水量再乘以该土层的土壤容重即为容积含水量。

$$\Delta W=\sum_{i=1}^n(W_{1i}-W_{2i})$$

(3)

式中: i ——土壤层次号数; n ——土壤层次总数目。
0—100 cm 每 10 cm 为一层次的容积含水率,100—200 cm 每 20 cm 为一层次的容积含水率,测定深度为 200 cm,因此 n 值为 15。为了方便水量平衡的计算,将容积含水率换算为以 mm 为单位的土壤含水量 W 。

$$W=\theta\cdot h/100$$

(4)

式中: θ ——土壤容积含水率(%); h ——土层厚度(mm)。

(4) 数据统计分析。数据整理采用 Microsoft Excel 2003,数据分析采用 SPSS 17.0,并采用新复极差法(SSR)检验各处理间的差异显著性水平,采用 Origin 7.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 种植密度对冬小麦根系生长的影响

从表 2 可以看出,随种植密度的提高,各品种冬小麦根干重密度和根长密度的变化趋势不同。丰产 3 号在低密度时根干重密度和根长密度最大,且与高密度相比差异均显著($p<0.05$)。小偃 6 号在中密度时根干重密度和根长密度达到最大,且与高密度相比差异显著($p<0.05$)。长早 58 在高密度时根干重密度和根长密度最大,且与低密度相比差异显著($p<0.05$)。从品种替代的次序来看,在低密度时,根系随品种演替呈逐渐减小的趋势,但在高密度时这种趋势却发生了逆转。这说明,不同冬小麦品种的根系对密度的反应次序为:丰产 3 号>小偃 6 号>长早 58,现代品种长早 58 较早期品种耐密性提高。

从图 1 可以看出,种植密度对各品种冬小麦根系

的空间分布均有影响。各品种根系的空间分布对种植密度的响应不同:丰产 3 号在低密度时,深层土壤(≥ 80 cm,下同)中的根长密度均显著高于中、高密度, ($p<0.05$);小偃 6 号在中密度种植时,深层土壤中的根长密度均显著高于低、高密度($p<0.05$);长早 58 在高密度种植时,深层土壤中的根长密度均显著高于低、中密度($p<0.05$)。

2.2 种植密度对水分利用效率(WUE)和产量的影响

从表 2 可以看出,随种植密度的提高,各品种冬小麦的 WUE 和产量均受到影响。丰产 3 号在低密度时水分利用效率最大,产量最高,且与高密度相比差异显著($p<0.05$)。小偃 6 号在中密度分利用效率最大,产量最高,且与低、高密度相比差异显著($p<0.05$)。现代品种长早 58 在高密度时水分利用效率最大,产量最高,且与中、低密度相比差异显著($p<0.05$)。从品种替代次序来看,在中高密度下水分利用效率和产量都呈上升趋势。

2.3 小麦根系生长与水分利用效率(WUE)和产量的关系

从表 2 和图 1 可以看出,对于某一特定的品种而言,其产量和 WUE 随根干重密度和根长密度及深层根系的增大而提高。丰产 3 号,低密度时根重密度、根长密度及深层根系最大,WUE 和产量最高;小偃 6 号在中密度时根干重密度、根长密度及深层根系最大,WUE 和产量最高;长早 58 在高密度时根干重密度、根长密度及深层根系最大,WUE 和产量最高。从品种更替的次序来看,在本试验条件下,随品种更替冬小麦的最大根干重密度和根长密度均呈逐渐降低趋势,而最大 WUE 和产量却呈上升趋势。这说明,在半干旱地区根重密度和根长密度可能是影响小麦 WUE 和产量的关键因素之一,但存在冗余,只不过这种冗余随品种更替而降低,并因此提高了水分利用效率和产量。

表 2 各品种冬小麦在不同种植密度下的产量、水分利用效率,根长密度和根干重密度

品 种	种植密度/ (万株·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	根长密度/ (cm·cm ⁻³)	根干重密度/ (g·m ⁻³)
丰产 3 号	100	6590.00a	13.57a	0.38a	43.84a
	250	5593.31ab	12.24a	0.31ab	35.89b
	350	4970.00b	10.53b	0.24b	27.21c
小偃 6 号	100	5833.30b	12.97b	0.28c	33.84ab
	250	6690.00a	13.99a	0.34a	41.04b
	350	5093.30b	10.82c	0.21b	29.64a
长早 58	100	7166.70c	15.20c	0.18c	26.51b
	250	8183.30b	17.55b	0.24b	32.32ab
	350	9496.70a	19.96a	0.28a	34.61a

注:表中数据为 3 次重复试验结果的平均值;表中数字后的不同字母表示同一品种不同密度间的差异显著性($p<0.05$)。

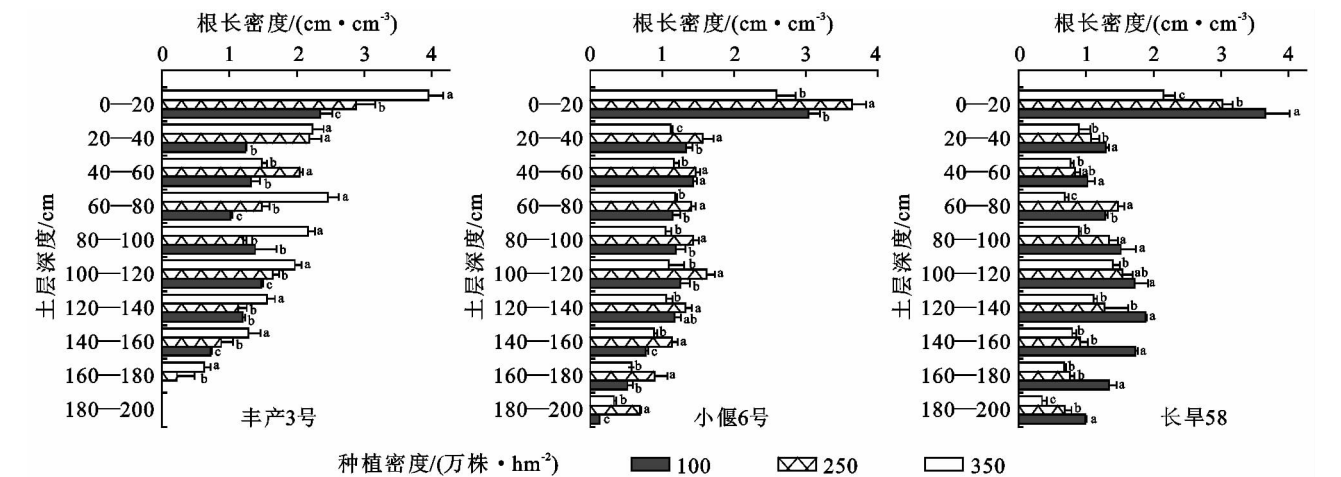


图1 种植密度对冬小麦根系空间分布的影响

注:不同字母表示同一土层不同密度处理之间差异显著($p < 0.05$)。

3 讨论

虽然有关干旱与半干旱地区小麦根系与产量的关系已有大量研究,但仍存在很大争议^[14]。一些研究认为,在半干旱地区,想要获得高产,就必须选择较大的根系,根系越大,作物获得的水分就越多,因而产量就越高^[15-16];而也有些研究认为在半干旱地区根系较小的品种,可以提高水分利用效率,从而获得高产^[8,17]。本文研究结果表明,冬小麦在品种更替过程中其低密度(100 万株/hm²)下根量和形成最高产量时的根量均呈减小趋势,但产量却呈上升趋势,这表明其产量的提升可能与根量的减小有关。此外,一些研究表明深层根系的增加有利于提高作物对土壤深层水分的利用,从而促进作物产量的提高^[18-19],但 Palta 等^[14]认为对于依赖于土壤中储存水的作物,土壤深层根量的增加有可能导致减产。在黄土高原半干旱地区,小麦的生长主要依靠上一年土壤中储存的水分^[9]。本文的研究结果表明,在黄土高原半干旱地区,对冬小麦来说,土壤深层根量的增加能够促进产量的提升。

本文的研究还表明,在半干旱地区对于某一特定的小麦品种而言,其 WUE 和产量随根重密度和根长密度的增大而提高。其可能原因是生殖生长阶段若作物根系达到较高水平,能够最大限度地获取土壤中的水分和养分等,并形成最高产量。但各品种小麦形成群体水平最大根系时的种植密度存在差异,例如,在低种植密度下早期品种丰产 3 号的根重密度和根长密度大于现代品种长旱 58,在高种植密度下早期品种丰产 3 号的根重密度和根长密度反而小于现代品种长旱 58。其可能的原因是:早期品种根系较现代品种大,并且根系的吸水能力强,能够促进作物早期的营养生长,但是土壤底墒过早过快的消耗,可能会导

致后期的土壤严重干旱(即生物利用干旱^[20]),抑制了根系正常生长,且对作物的生殖生长和产量形成不利影响。相反地,拥有较小根系的现代小麦品种,可能因其个体间竞争相对较弱,对土壤底墒的消耗较低,从而可以在高种植密度下根系达到最大,并形成最高的 WUE 和产量。

4 结论

本试验表明,在黄土高原半干旱地区冬小麦品种更替过程中,新品种较老品种的根量减小,耐密性提高,从而促进了小麦的水分利用效率和单产的提升。换言之,冬小麦的根系生长可能存在对其产量和 WUE 不利的冗余,只不过这种根系生长的冗余随品种的更替而降低,并因此提高了其水分利用效率和产量。在今后的小麦育种中应更加关注降低根系冗余,提高耐密性,利用群体效应,促进小麦单产的提升。本文的不足之处在于,相关结论仅基于一个地区一年的试验结果。

参考文献:

- [1] Boogaard R V D, Veneklaas E J, Lambers H. The association of biomass allocation with growth and water use efficiency of two *Triticum aestivum* cultivars[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1996, 23 (5): 751-761.
- [2] Brancourt-Hulmel M, Doussinault G, Lecomte C, et al. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992[J]. Crop Science, 2003, 43(1): 37-45.
- [3] Shearman V J, Sylvester-Bradley R, Scott R K, et al. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK[J]. Crop Science, 2005, 45(1): 175-185.
- [4] 曹广才. 华北小麦[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 27-

- 28.
- [5] 张荣,孙国钧,张大勇. 干旱、半干旱地区作物育种的困惑与出路[J]. 西北植物学报, 2000, 20(6): 930-935.
- [6] Siddique K H M, Belford R K, Tennant D. Root : Shoot ratios of old and modern, tall and semi-dwarf wheats in a mediterranean environment[J]. Plant and Soil, 1990, 121(1): 89-98.
- [7] 张岁岐,山仑,邓西平. 小麦进化中水分利用效率的变化及其与根系生长的关系[J]. 科学通报, 2002, 47(17): 1327-1331.
- [8] 张荣,孙国钧,李凤民,等. 两春小麦品种竞争能力、水分利用效率及产量关系的研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 235-242.
- [9] 李话,张大勇. 半干旱地区春小麦根系形态特征与生长冗余的初步研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 26-30.
- [10] Guberac V, Martincic J, Maric S, et al. Grain yield components of winter wheat new cultivars in correlation with sowing rate [J]. Cereal Research Communications, 2000, 28(3): 307-314.
- [11] Patrick M C, Richard D H, Woodrow W P. Tillage and seeding rate effects on wheat cultivars[J]. Crop Science, 2003, 43(1): 210-218.
- [12] Gooding M J, Pinyosinwat A, Ellis R H. Responses of wheat grain yield and quality to seed rate[J]. Journal of Agricultural Science, 2002, 138(3): 317-331.
- [13] 刘立生,张岁岐,王征宏. 不同倍性小麦材料对水分和密度条件的响应[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 203-209.
- [14] Palta J A, Chen X, Milroy S P, et al. Large root systems: Are they useful in adapting wheat to dry environments[J]. Functional Plant Biology, 2011, 38(5): 347-354.
- [15] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E. Root water uptake and transport: Using physiological processes in global predictions[J]. Trends in Plant Science, 2000, 5(11): 482-488.
- [16] Hurd E A. Phenotype and drought tolerance in wheat [J]. Agricultural Meteorology, 1974, 14(1/2): 39-55.
- [17] Passioura J B. Roots and drought resistance[J]. Agricultural Water Management, 1983, 7(1/3): 265-280.
- [18] O'Brien L. Genetic variability of root growth in wheat (*T. aestivum* L.) [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1979, 30(4): 587-595.
- [19] Manske G G B, Vlek P L G. Root Architecture-Wheat as a Model Plant[M]//Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. Plant roots: the hidden half, 2002: 49-259.
- [20] 陶毓汾,王立祥,韩仕峰,等. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 41-47.

(上接第18页)

- [2] Chen W, Fryrear D W. Grain-size distributions of wind-eroded material above a flat bare soil[J]. Physical Geography, 1996, 17(6): 554-584.
- [3] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. Environment International, 2003, 29(4): 437-450.
- [4] 刘东伟,吉力力·阿不都外力,雷加强,等. 盐尘暴及其生态效应[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 168-173.
- [5] 吉力力·阿不都外力,徐俊荣,穆桂金,等. 艾比湖盐尘对周边地区土壤盐分及景观变化的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 928-939.
- [6] 吉力力·阿不都外力,穆桂金. 艾比湖干涸湖底尘暴及其灾害分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(2): 149-154.
- [7] 吉力力·阿不都外力,刘东伟,徐俊荣. 艾比湖干涸湖底不同地表类型风蚀强度及粉尘输移通量的风洞试验研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 63-67.
- [8] 毋兆鹏. 干旱区绿洲稳定性驱动机制研究: 以艾比湖流域为例[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 92-98.
- [9] 刘东伟,吉力力·阿不都外力,穆桂金,等. 艾比湖干涸湖底化学组成及盐尘的风运堆积[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2): 157-162.
- [10] 王勇辉,王艳丽,海米提·依米提. 博尔塔拉河下游河岸带土壤盐分特征分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 139-142.
- [11] 包安明,穆桂金,章毅,等. 控制艾比湖干涸湖底风蚀的合理水面估算与效果监测[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 56-60.
- [12] 张小龙. 艾比湖流域气候变化及其径流响应[J]. 盐湖研究, 2011, 19(2): 11-14.
- [13] 王银山,于恩涛,何雪芬,等. 艾比湖湿地主要盐生植物叶片稳定碳同位素组成研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 243-250.
- [14] 何学敏,吕光辉,秦璐,等. 艾比湖地区典型乔灌群落水盐胁迫下土壤重金属对酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 91-99.
- [15] 王前进,巴音查汗,马道典,等. 艾比湖水面积近50a变化成因分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 224-227.
- [16] 苏永中,赵文智. 土壤有机碳动态: 风蚀效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2049-2052.