

空间布局对西北极端干旱区枣棉间作复合系统水分利用效率的影响

黄光伟, 陈国栋*, 万素梅, 刘太杰, 李燕芳, 樊文霞 (塔里木大学植物科学学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘要 [目的] 解析农林间作水分高效利用机制。[方法] 以西北极端干旱区典型模式枣棉间作为研究对象, 通过设置不同棉花种植行数和棉花株距研究空间布局对枣棉间作复合系统水分利用效率的影响。[结果] 与单作相比, 枣棉间作具有明显提高产量和土地利用率的优点, 种植行数对间作产量的影响效应显著。间作条件下耗水量高于对应单作, 但也能显著提高水分利用效率, 种植行数与棉花株距互作作用对间作水分利用效率的产生效应, 通过空间布局能够协调枣棉间作种间关系, 提高水分高效性。[结论] 枣棉间作群体较单作更能够显著提高水分利用效率, 在农林复合群体中, 林木根系一般较深, 能充分利用土壤深层营养物质和水分, 农作物则利用浅层土壤中的养分和水分, 由于根系垂直生长呈多波顺次递推特点, 使根系生长中心和吸收中心交错出现, 提高了养分和水分的利用效率。

关键词 枣棉间作; 叶面积指数; 耗水量; 水分利用效率; 空间布局; 西北极端干旱区

中图分类号 S181.6 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)11-0086-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.11.024



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Spatial Distribution on Water Use Efficiency of Jujube-cotton Intercropping System in Extreme Arid Areas of Northwest China

HUANG Guang-wei, CHEN Guo-dong, WAN Su-mei et al (College of Plant Science, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300)

Abstract [Objective] In order to analyze the mechanism of water efficient utilization in agroforestry intercropping. [Method] Taking the typical model of the extreme arid area in Northwest China as the research object, the effects of spatial distribution on water use efficiency of jujube-cotton intercropping system were studied by setting different rows of cotton and cotton spacing in the typical model of jujube-cotton intercropping. [Result] Compared with single cropping, jujube-cotton intercropping had obvious advantages in increasing yield and land use efficiency, and the number of rows had a significant effect on the yield of intercropping. Water consumption under intercropping was higher than that under corresponding monoculture, but water use efficiency could also be significantly improved. The interaction between rows and cotton plant spacing had an effect on the yield of intercropping WUE. The spatial distribution could coordinate the inter-cropping relationship between jujube and cotton and improve water efficiency. [Conclusion] The water use efficiency of jujube-cotton intercropping population is better than that of single cropping. In agroforestry complex population, the root system of trees is generally deeper, which can make full use of the deep soil nutrients and water. Crops use the nutrients and water in shallow soil. Because the vertical growth of roots is multi-wave and successive recurrence characteristics, the root system of jujube-cotton intercropping population can make full use of the deep soil nutrients and water. Root growth centers and absorption centers alternate, which improves nutrient and water use efficiency.

Key words Jujube-cotton intercropping system; Leaf area index; Water consumption; Water use efficiency; Spatial distribution; Extreme arid area in Northwest China

农林间作系统是运用生态位、种群共生、边际效应、生态工程技术的一种人工生态复合系统。它利用各因子相互协调的原理, 将农林不同作物有机地结合起来进行经营, 以达到提高对土地、光温、水分及肥料的利用效率的目的, 增加了土地的生产力, 在保持水土和能源的同时, 单位面积土地上获得了最大的经济、生态和社会效益^[1]。近年来, 在解决林棉间作模式争肥争水矛盾中, 枣树具有不可替代的作用, 已成为塔里木盆地农民脱贫致富的主要经济树种, 是开展果棉间作的最佳树种, 而且枣树适应性强, 耐旱、耐盐碱, 易于管理, 在新疆尤其是南疆塔里木盆地发展迅速, 其面积和产量已位居全国前列^[2]。

新疆位于欧亚大陆腹地, 属典型大陆性干旱气候, 是我国主要的棉花生产基地, 具有鲜明的地区特色, 加之南疆各地区现已将发展红枣作为农业结构调整和强区富民的首选产业进行大力推进, 近年来, 为促进新疆南部环塔里木地区林果产业快速发展, 同时又要使现有的棉花面积与产量不受太大影响, 南疆地区各地州大多采用枣棉间作的方式立体种

植^[3]。而水资源缺乏一直制约着南疆地区农业的快速发展, 因此, 探索一条水分高效、农业增收的可持续发展之路势在必行^[4]。

种间关系是农林复合系统的重要基础理论之一, 一定程度上对复合系统的生产力、稳定性以及可持续发展起主导作用。如何使互补作用最大和竞争程度最低是决定农林复合系统优化经营的要点^[5-6]。在干旱和半干旱地区, 水分成为限制植物生长的关键因子。当竞争作用和逆境因子结合时, 水分竞争关系变得尤为明显^[7]。笔者以南疆枣棉间作为研究对象, 通过设置不同棉花空间布局, 旨在通过农艺措施协调种间关系, 为南疆地区发展节水型集约可持续农业提供理论和实践支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况 该试验于2016—2017年在塔里木大学园艺试验站进行, 枣树株行距为3.0 m×0.5 m, 其地势平坦, 土壤为砂壤土, 通气性好。属于暖温带典型的极端大陆性干旱荒漠气候, 极端最高气温35℃, 极端最低气温-28℃。该地太阳辐射年均均为5 000~6 400 MJ/m², 年均日照时数2 556.3~2 991.8 h。冬季少雪, 地表蒸发强烈, 年均降水量为40.1~82.5 mm, 年均蒸发量1 976.6~2 558.9 mm。

1.2 试验设计 试验采用裂区试验设计, 以枣/棉行比配置

基金项目 国家自然科学基金项目(31601272); 塔里木大学校长基金(TDZ-KJC201606); 大学生创新创业训练计划项目(2018066)。

作者简介 黄光伟(1994—), 男, 贵州松桃人, 硕士研究生, 研究方向: 作物高效生理生态。*通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事作物高产理论与技术研究。

收稿日期 2018-12-10

为主处理,棉花株距配置为副处理。主处理分 C₂(距枣树 1.45 m 种植 2 行棉花)、C₄(距枣树 1.0 m 种植 4 行棉花),副处理分为 R₁(株距 12.5 cm)和 R₂(株距 10.0 cm)2 种棉花种植株距,为试验具有可比性,另设单作棉花(C)和单作枣树(J),共组成 7 个处理,重复 3 次,小区面积为 3 m×10 m。棉花采用地膜覆盖,灌溉方式为滴灌,试验其他管理措施与当地习惯水平相同。

供试棉花品种为瑞杂一号,2017 年 4 月 13 日播种,于 10 月 8 日进行第一次收获;枣树为成龄(第 5 年)灰枣,株行距为 1 m×3 m,于 10 月 20 日收获。施肥情况按照红枣、棉花施肥标准,各处理间红枣和棉花的施肥量、灌水量均一致,试验地其他管理措施同大田。

1.3 测定项目

1.3.1 土壤含水量。分 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5 层测定,用烘干法测定土壤含水量。

1.3.2 土壤贮水量。用 0~100 cm 土壤含水量计算土壤贮水量(SWS),SWS 为 5 个不同土壤层次贮水量的总和。

1.3.3 作物生育期耗水量。作物生育期耗水量(ET)的计算公式为 $ET = P + I + SWS_0 - SWS_h$,式中, P 为生育期内降雨量(mm), I 为生育期内灌溉量(mm), SWS₀ 为播前土壤贮水量(mm), SWS_h 为收获后土壤贮水量(mm)。

1.3.4 水分利用效率。水分利用效率(WUE)的计算公式为 $WUE = \frac{Y}{ET}$,式中, Y 为间作系统产量, ET 为耗水量。

1.3.5 叶面积及叶面积指数。生育期内每 15~20 d 用叶面积仪测定作物的叶面积。叶面积指数(LAI)用下式计算: $LAI = \text{每公顷实有株数} \times \text{单株叶面积}(\text{m}^2) / 10\,000 \text{ m}^2$ 。

1.3.6 产量及产量指标。在各处理中选择长势均匀的 5 株棉花定株进行各项指标的连续测定。测定选定棉株的蕾数、铃数、开花数和果枝数;测定 6.67 m²的株数、单株铃数、单铃重,计算出产量。

1.4 数据分析 将所得试验数据整理后,用 Excel 2003 和 DPS 9.05 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同间作处理的产量和土地利用效率

2.1.1 土地当量比。从表 1 可看出,不同间作处理的土地利用效率(LER)均大于 1,说明枣棉间作具有明显提高土地利用率的趋势。不同的种植模式影响枣树间作棉花中的补偿作用,从而影响 LER 的提高。不同种植模式水平下 LER 从大到小依次为 C₄R₂、C₄R₁、C₂R₂、C₂R₁、C₄R₂ 处理下 LER 最高,显著高于其他处理,说明种植 4 行棉花下,通过减小棉花株距能够提高间作的整体效益,最大化发挥符合群体的增产增效作用。

2.1.2 产量表现。从表 1 可看出,不同的种植方式显著影响棉花和红枣间作的产量。C₂R₁、C₂R₂、C₄R₁ 和 C₄R₂ 复合群体总产量较单作分别提高 6.34%~17.07%、1.24%~11.46%、2.80%~13.18%、9.23%~20.26%,差异达到显著水平。比较间作 2 种作物净占地面上的产量发现不同的间

作模式对棉花、红枣组分产量的作用不同,不同种植方式下,棉花组分产量从高到低依次为 CR₁、CR₂、C₄R₂、C₄R₁、C₂R₂、C₂R₁,差异达到显著水平;红枣组分产量从高到低依次为 J、C₂R₁、C₂R₂、C₄R₁、C₄R₂,差异达到显著。说明在红枣间作棉花中不同的空间配置处理对土壤空间的叠加利用及水分、养分在作物带之间的相互交流是间作产量优势形成的主要原因,枣树间作棉花中存在一定的补偿机理,在一种作物产量显著提高的同时另一种作物产量降低不明显。

表 1 不同间作处理的产量和土地利用效率

Table 1 Yield and land use efficiency of different intercropping treatments

处理 Treatment	籽棉产量 Seed cotton yield kg/hm ²	红枣产量 Jujube yield kg/hm ²	土地利用效率 LER
J	—	6 356 ± 292 a	—
CR ₁	5 733 ± 342 a	—	—
CR ₂	5 310 ± 254 a	—	—
C ₂ R ₁	2 294 ± 343 c	4 465 ± 190 b	1.10 ± 0.02 c
C ₂ R ₂	2 616 ± 221 d	3 819 ± 264 c	1.12 ± 0.03 bc
C ₄ R ₁	3 380 ± 288 b	3 154 ± 182 d	1.16 ± 0.02 b
C ₄ R ₂	3 965 ± 324 b	2 978 ± 201 d	1.22 ± 0.03 a

注:数据为 3 个重复的平均值。同列不同小写字母表示处理间的差异显著(P<0.05)

Note: Data were 3 repeated averages. Different lowercases in the same column showed significant differences between treatments (P<0.05)

为明确种植行数和棉花株距对间作产量的影响,以种植行数为主因素,棉花株距为副因素,分析两者对间作产量的效应大小。结果表明,种植行数对间作产量的效应显著(P=0.128<0.05),棉花株距对间作产量的效应不显著(P=0.914>0.05),根系分隔方式和供水水平的互作效应不显著。增加间作棉花行数有利于间作群体总产量的增加,种植 4 行棉花总产量较 2 行棉花增加 3.6%;增加间作棉花行数有利于籽棉产量的增加,但红枣产量随着棉花种植行数的增加而减小。棉花株距显著影响间作组分作物的产量,随着株距的减小,籽棉产量随之增加,而红枣产量随之减小。

2.2 不同间作处理的叶面积指数

2.2.1 叶面积指数在红枣各生育期间的变化。叶面积指数(LAI)对每一种作物来说是评价群体的重要指标,密度是影响叶面积指数的重要因素。从表 2 可以看出,不同处理红枣叶片指数从新稍期到膨大期,因枣叶的数量急聚增加,使叶片面积持续增长,由此 LAI 也呈现出逐渐上升的变化。对红枣叶面积的变化情况进行分析可知,其在盛花期和膨大期增长较快,且各处理红枣的 LAI 在膨大期均达最大值。进入盛花期后,枣叶片的光合作用慢慢下降同时把养分转移至果实,故导致叶片枯黄掉落,使得叶面积指数在成熟期后迅速降低。

2.2.2 叶面积指数(LAI)在棉花各生育期间的变化。从单作和间作棉花叶片指数在生育期间的变化情况(表 3)可看出,随着密度增加,叶面积指数呈增加趋势;从不同生育期来看,随着生育期推移,叶面积指数在盛铃期达到最大值,到了吐絮期后缓慢下降。同一密度同一时期比较来看差异不显

著,而不同密度同一生育期的叶面积指数差异比较显著。初花期到盛铃期,各处理的棉花枝叶数量增加,叶面积指数增长。在初花期叶面积指数表现为 $CR_1 > C_2R_1$ 、 $CR_1 > C_2R_2$ 、 $CR_1 > C_4R_1$ 、 $CR_1 > C_4R_2$, 表现为差异显著;盛花期叶面积指数表现为 $CR_1 > C_4R_1$ 、 $CR_2 > C_4R_2$ 、 $CR_2 > C_4R_1$ 、 $CR_2 > C_4R_2$, 差异达到显著;盛铃期叶面积指数表现为 $CR_2 > CR_1$ 、 $CR_2 > C_2R_1$ 、 $CR_2 > C_2R_2$ 、 $CR_2 > C_4R_1$ 、 $CR_2 > C_4R_2$, 差异达到显著。说明棉花 CR_1 或 CR_2 处理的叶面积指数是最大。吐絮期叶面积指数表现为 $C_4R_2 > CR_1$ 、 $C_4R_2 > CR_2$, 差异达到显著。说明棉花在吐絮期阶段时叶面积指数随着密度而增加。

表2 不同间作处理的枣树叶面积指数

Table 2 Jujube leaf area index under different intercropping treatments

处理 Treatment	新梢期 New shoots period	盛花期 Full-blossom period	膨大期 Expansion period	成熟期 Mature period
J	0.65 a	1.01 a	1.42 a	1.15 b
C_2R_1	0.63 a	0.96 a	1.36 ab	1.24 a
C_2R_2	0.58 a	0.91 a	1.33 b	1.18 ab
C_4R_1	0.53 ab	0.89 a	1.26 bc	1.21 a
C_4R_2	0.51 b	0.83 b	1.21 c	1.15 b

注:同列不同小写字母表示处理间的差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercases in the same column showed significant differences between treatments ($P < 0.05$)

表3 不同间作处理的棉花叶面积指数

Table 3 Cotton leaf area index under different intercropping treatments

处理 Treatment	初花期 Initial flowering stage	盛花期 Full-blossom period	盛铃期 Blooming cotton boll period	吐絮期 Blow-of- cotton period
CR_1	1.96 a	2.35 a	3.63 b	2.65 b
CR_2	1.83 ab	2.43 a	4.07 a	2.58 b
C_2R_1	1.73 b	2.18 ab	3.65 b	3.18 a
C_2R_2	1.75 b	2.26 ab	3.85 b	3.35 a
C_4R_1	1.63 c	1.96 b	3.35 c	3.26 a
C_4R_2	1.72 bc	2.08 b	3.62 b	3.49 a

注:同列不同小写字母表示处理间的差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercases in the same column showed significant differences between treatments ($P < 0.05$)

2.3 不同间作处理的耗水量 由表4可知,单作棉花和红枣的耗水量最小,间作较单作显著增加了作物耗水量,主要表现在间作在作物生长后期较单作消耗较多的土壤水分,对作物生长后期土壤水分利用较充分,使得间作群体收获后土壤贮水量显著低于单作,可以认为在当前灌溉制度下,在不影响作物生长的同时,单作枣树或单作棉花后期灌溉量仍有减少的可能性。

为明确种植行数和棉花株距对间作耗水量的影响,以种植行数为主要因素,棉花株距为副因素,分析种植行数和棉花株距对耗水量的效应大小。结果表明,种植行数对间作耗水量的效应不显著($P = 0.584 > 0.05$),棉花株距对间作产量的效应不显著($P = 0.836 > 0.05$),种植行数×棉花株距对间作耗水量的效应显著($P = 0.035 < 0.05$)。 C_4R_1 处理耗水量显著高于 C_2R_2 和 C_4R_1 。表明增加棉花行数的同时,适当减少

棉花株距有利于间作耗水量的减小。

表4 不同间作处理的土壤贮水量和耗水量

Table 4 Soil water storage and consumption under different intercropping treatments

处理 Treatment	播前土壤 贮水量 Soil water storage before sowing mm	降雨量 Precipitation mm	灌水量 Irrigation amount m^3	收后土壤 贮水量 Soil water storage after harvest mm	耗水量 Water consumption mm
J	214.6	77.6	525	210.1	607.1 c
CR_1	220.8	77.6	525	205.7	617.7 c
CR_2	220.8	77.6	525	207.6	615.8 c
C_2R_1	218.3	77.6	525	176.2	644.7 b
C_2R_2	212.2	77.6	525	184.8	644.7 b
C_4R_1	224.3	77.6	525	146.3	680.6 a
C_4R_2	228.5	77.6	525	174.9	656.2 ab

注:同列不同小写字母表示处理间的差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercases in the same column showed significant differences between treatments ($P < 0.05$)

2.4 不同间作处理的水分利用效率 从图1可以看出,单作红枣的水分利用效率比单作棉花的水分利用效率高14%~22%,差异达到显著水平($P < 0.05$)。间作棉花水分利用效率高于单作棉花,说明间作种植模式具有提高水分利用效率的作用。

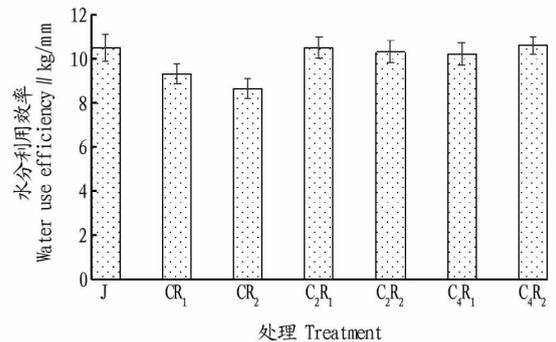


图1 不同间作处理的水分利用效率

Fig. 1 Water use efficiency of different intercropping treatments

以种植行数为主要因素,棉花株距为副因素,分析种植行数和棉花株距对水分利用效率的效应。结果表明,种植行数对间作水分利用效率的效应不显著($P = 0.584 > 0.05$),棉花株距对水分利用效率的效应不显著($P = 0.836 > 0.05$),种植行数×棉花株距对间作水分利用效率的效应不显著($P = 0.412 > 0.05$)。

3 结论与讨论

土壤水分是农林复合系统中林木与间作物之间主要的竞争对象,因此,充分了解农林复合系统中土壤水分的时空分布特征及其影响机理,对于优化复合模式和实施种间调控具有重要的指导意义^[8]。一方面研究结论认为,复合系统中树木降低作物蒸腾的作用,提高土壤含水量。赵斯等^[9]研究表明,农林复合生态系统中土壤含水量高于纯农地,其中小黑杨-大豆复合模式土壤的含水量较高。高峻^[10]研究山西中阳县黄土丘陵沟壑区梯田杏树-黄芪复合系统得出,复合

系统较单作系统具有较高的土壤贮水量,复合系统树盘内 0~150 cm 深土层的土壤含水量高于单作杏园,有利于土壤水分状况的改善。另一方面,研究者认为农林复合系统不具有改善农田土壤水分状况的作用。徐明岗等^[11]研究红壤丘陵区不同种草模式的水土保持效应得出,在高温干旱的 7—9 月 0~80 cm 土层内的水分含量明显低于梯田果树区,表明在干早期牧草对果树生长有一定的影响。惠竹梅等^[12]研究西北半干旱地区葡萄生产园行间生草对土壤含水量的影响,结果得出,生草可明显降低葡萄园土壤水分含量,这与该研究的结果基本一致,枣棉间作条件下,间作群体耗水量大大增加, C_4R_1 处理耗水量显著高于 C_2R_2 和 C_4R_1 ,表明增加棉花行数的同时,适当减少棉花株距有利于间作耗水量的减小。

水分利用效率是植物生理活动过程中消耗水形成有机物质的基本效率,是确定植物体生长发育所需要的最佳水分供应的重要指标之一,在一定程度上反映了植物的耗水性和干旱适应性^[13]。水分利用效率越高,表明植株节水能力越强,耐旱生产力越高。高水分利用效率是植物适应水分亏缺的一种响应机制或响应干旱环境的一种重要特征。农林复合系统具有提高水分利用率的作用。陆光明等^[14]研究表明,在泡桐树和冬小麦、玉米间作系统中,间作玉米水分利用率较对照高 16.1%,系统中冬小麦水分利用率较对照高 15.2%;卫林等^[15]研究也指出,林带有一种致冷作用,它使小麦的叶温降低,减少叶片的蒸腾,提高农田土的水分含量或水分利用率;晁海等^[16]通过各系统各土层深度含水量的比较,发现合理的株行间距配置,能够较对照显著提高水分利用率。该研究表明,枣棉间作群体较单作能够显著提高水分利用效率,主要原因是农林复合群体中,林木根系一般较深,能充分利用土壤深层营养物质和水分,农作物则利用浅层土壤中的养分和水分,由于根系垂直生长呈多波顺次递推特点,使根系生长中心和吸收中心交错出现,提高了养分和水分的利用效率^[17-18]。

复合群体水分利用效率的提高受到组分作物产量、耗水

特征及群体微环境的共同作用,间作组分作物间各影响因子的变化决定了群体水分利用状况,在研究群体耗水特征的同时,应该注意,土壤水分分布状况及土壤水分效应在一定程度也反映了种间竞争与互补的一种重要结果,因此,在研究了解种间水分相互作用结果的表现形式的同时,更应深入研究种间互作过程及其影响机制。

参考文献

- [1] 郭雄飞,黎华寿,陈红跃. 农林间作生态系统研究进展探析[J]. 绿色科技,2016(16):176-179.
- [2] 王娟,江天才,万素梅. 水分胁迫下间作棉田土壤水分及产量分析[J]. 干旱区研究,2016,33(1):89-93.
- [3] 万素梅,郑德明,翟玉龙,等. 南疆棉田不同产量构成因素及棉铃空间分布特征研究[J]. 中国棉花,2006,33(8):8-21.
- [4] 蒋青松,杨超,董君成,等. 基于可持续发展的南疆区域农业水资源优化配置模型研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(24):14739-14741,14851.
- [5] 高路博. 晋西黄土区苹果农作物间作系统种间关系研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
- [6] 陈国栋,万素梅,冯福学,等. 带型对小麦间作玉米产量和种间竞争力的影响[J]. 西北农业学报,2017,26(7):990-997.
- [7] 张曦. 紫花苜蓿响应干旱胁迫的叶性状机制研究[D]. 兰州:兰州大学,2015.
- [8] 蔡崇法,王峰,丁树文,等. 间作及农林复合系统中植物组分间养分竞争机理分析[J]. 水土保持研究,2000,7(3):219-221,252.
- [9] 赵斯,赵雨森,王林,等. 东北黑土区农林复合土壤效应[J]. 东北林业大学学报,2010,38(5):68-70.
- [10] 高峻. 太行山低山丘陵区两种农林复合模式中水肥光分布特征研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [11] 徐明岗,文石林,高菊生. 红壤丘陵区不同种草模式的水土保持效果与生态环境效应[J]. 水土保持学报,2001,15(1):77-80.
- [12] 惠竹梅,李华,刘延琳,等. 果园生草对土壤性状的作用研究进展[J]. 中国农学通报,2005,21(5):284-287.
- [13] 山仑. 提高农田水分利用效率的途径[J]. 植物生理学通讯,1997,33(6):475-476.
- [14] 陆光明,孟平,马秀玲,等. 林-果-农复合系统中植物蒸腾及系统蒸散的研究[J]. 中国农业大学学报,1996,1(5):103-109.
- [15] 卫林,江爱良,宋兆民. 林带对农田小麦叶温的影响[J]. 林业科学,1982,18(2):135-142.
- [16] 晁海,张大海,徐林,等. 杏棉间作系统小气候水平分布特征研究[J]. 新疆农业大学学报,2007,30(1):35-39.
- [17] 冯良山. 花生谷子间作水分养分高效利用机制研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2013.
- [18] 张恩和,李玲玲,黄高宝,等. 供肥对小麦间作蚕豆群体产量及根系的调控[J]. 应用生态学报,2002,13(8):939-942.

(上接第 85 页)

- [4] 陈进军,郑翀,郑少奎. 表面流人工湿地中水生植被的净化效应与组合系统净化效果[J]. 环境科学学报,2008,28(10):2029-2035.
- [5] 杨珏. 不同水生植物配置模式对垃圾填埋场渗滤液尾水的净化能力研究[D]. 上海:华东师范大学,2011.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [7] 鲁光四,周怀东,李怡庭. 水质分析方法[M]. 北京:学术书刊出版社,1989.
- [8] 王海. 人工湿地中植物多样性对生物量及无机氮的影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [9] 江小雷,岳静,张卫国,等. 生物多样性,生态系统功能与时空尺度[J]. 草业学报,2010,19(1):219-225.
- [10] HE J S, BAZZAZ F A, SCHMID B. Interactive effects of diversity, nutri-

- ents and elevated CO₂ on experimental plant communities [J]. *Oikos*, 2002, 97(3):337-348.
- [11] 彭婉婷,邹琳,段维波. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J]. 环境科学学报,2012,32(3):612-617.
- [12] TANNER C C, CLAYTON J S, UPSDELL M P. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands. II. Removal of nitrogen and phosphorus [J]. *Water research*, 1995, 29(1): 27-34.
- [13] TANNER C C. Plants for constructed wetland treatment systems: A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species [J]. *Ecological engineering*, 1996, 7:59-83.
- [14] 唐金艳,曹培培,徐驰,等. 水生植物腐烂分解对水质的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(1):83-89.