

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

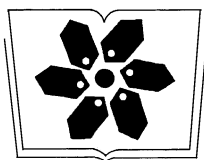
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 7 期 2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架	孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应	李 敏, 王 垠, 牟晓飞, 等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb(II) 和 Cd(II) 的生物吸附及其影响因素	姜 晶, 李 亮, 李海鹏, 等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应	韩立新, 汪有科, 张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法	施晓清, 杨建新, 王如松, 等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例	
.....	赵卉卉, 王 远, 谷学明, 等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价	白琳红, 王 卫, 张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理	
.....	王艳红, 吴晓民, 朱艳萍, 等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究	
.....	何春霞, 孟 平, 张劲松, 等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布	张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响	王西存, 于 毅, 周洪旭, 等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响	金凌波, 周 峰, 姚 涓, 等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期	
.....	徐岩岩, 张佳华, YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化	王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响	高晓容, 王春乙, 张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响	朱小红, 马中文, 马友华, 等 (2119)
丛枝菌根真菌对积根净离子流及锌污染下积苗矿质营养的影响	肖家欣, 杨 慧, 张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响	杨再强, 张 静, 江晓东, 等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态	刘 蕾, 申国珍, 陈芳清, 等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献	周小刚, 郭胜利, 车升国, 等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局	陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性	郑 宁, 张劲松, 孟 平, 等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究	
.....	徐少君, 曾 波, 苏晓磊, 等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....
..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

专论与综述

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

问题讨论

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

研究简报

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-04



封面图说: 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110281614

何春霞, 孟平, 张劲松, 高峻, 孙守家. 基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究. 生态学报, 2012, 32(7): 2047-2055.

He C X, Meng P, Zhang J S, Gao J, Sun S J. Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2047-2055.

基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究

何春霞, 孟平*, 张劲松, 高峻, 孙守家

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 农林复合系统的林木和作物会充分利用水肥光热等资源, 而在资源亏缺时也可能产生竞争, 在华北低丘山区等水资源紧缺地区, 种间水分竞争尤为突出。在冬小麦返青期、拔节期、灌浆期和成熟期 4 个生育期, 测算了该地区核桃-小麦间作系统和单作小麦不同组分的稳定碳同位素组成 (Stable carbon isotope ratio, $\delta^{13}\text{C}$) 和核桃树干液流, 结合生物量和气象数据资料计算出水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 和耗水量 (Water use, WU)。结果表明, 间作核桃树、间作小麦和单作小麦的 WUE 分别为 10.771—21.233、9.946—19.149 和 9.878—18.431 mmol C/mol H_2O 。单作小麦 WUE 在拔节期显著小于间作小麦。间作系统总耗水量为 1755.19 t/hm², 比单作系统的 2538.13 t/hm² 少 30.85%。核桃-小麦间作系统中, 核桃耗水量占系统总耗水量的 36.34%, 在小麦的生长前期所占比例最多、在小麦旺盛生长期所占比重较小, 而小麦越往生长后期需水越多。核桃与间作小麦的需水期错开, 在时间上避免水分竞争。距离核桃树越近浅层土壤含水量越高、而深层土越低, 表明核桃主要吸收深层水, 而间作小麦主要吸收浅层水, 从位置上避免水分竞争。单作小麦产量、总生物量和总耗水量分别比核桃间作小麦的高 26.79%、27.12%、36.30% ($P=0.001$ 、 $P=0.033$ 、 $P=0.050$)。间作核桃和单作核桃的单株果实产量平均分别为 0.88 和 0.94 kg ($P=0.829$)。然而, 核桃-小麦间作系统的产量土地当量比 (Land equivalent ratio, LER) 和产值水分利用效率 (WUE of economics, WUE_e) 却分别达到 1.67 和 25.92 元·mm⁻¹·hm⁻², 比单作系统明显提高、水资源获得高效利用, 同时具备生产优势和经济优势。

关键词: 核桃-小麦复合系统; $\delta^{13}\text{C}$; WUE; 耗水量; 产量; LER; WUE_e。

Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China

HE Chunxia, MENG Ping*, ZHANG Jinsong, GAO Jun, SUN Shoujia

Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Research Institute of Forest, Chinese Academy of Forest, Beijing 100091, China

Abstract: Trees and crops in agroforestry system can make the best use of water, nutrient, radiance and heat. However, competition may occur when resources are scarce, especially for the water competition in the warm temperate semi-arid region. Due to arid climate, less rainfall and poor irrigation condition, water is one of the major factors limiting the development of agriculture and forestry in the low hilly area of North China. Stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) of walnut (*Juglans regia* L.) -wheat (*Triticum aestivum*) intercropping system and monoculture wheat as well as sap flow of walnut tree at seedling establishment, jointing, filling and maturing growth period of winter wheat in the low hilly area of North

基金项目: “十二五”科技支撑项目 (2011BAD38B0201); 林业公益性行业科研专项课题 (201104009-04)

收稿日期: 2011-10-28; 修订日期: 2012-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mengping@caf.ac.cn

China were researched. Water use efficiency (WUE) and water use (WU) were calculated by using the $\delta^{13}\text{C}$ value, crop biomass, walnut sap flow and meteorological data. The results showed that the WUE of intercropping walnut, monoculture wheat and intercropping wheat were 10.771—21.233, 9.946—19.149 and 9.878—18.431 mmol C/mol H_2O , respectively. The WUE of intercropping wheat were significantly greater than that in monoculture wheat at wheat jointing growth period. The total water use of the walnut-wheat intercropping system was 1755.19 t/hm², which was 30.85% less than that in the monoculture wheat system (2538.13 t/hm²). Water consumption of the intercropping walnut accounted for 36.34% in the walnut-wheat intercropping system, respectively 62.09%, 30.80%, 35.58% and 27.24% at sowing-seedling establishment, jointing, flowering-filling and filling-maturing growth period of winter wheat. The walnut tree consumed the greatest amount of water at earlier growth period of winter wheat, and the less at vigorous growth stages of winter wheat. Contrary to the walnut, the water use of wheat was greater at its later growth period. Intercropping walnut and wheat staggered water demand periods and avoided temporal competition for water. Soil volumetric water content in the intercropping system was the greater the closer to the walnut tree in the shallow soil layer, and the less the closer to the walnut tree in the deep soil, which suggested that the walnut tree mainly absorbed deep water, while the intercropping wheat mainly absorb shallow water, it avoided spatial competition for water. The grain yield, total biomass and water use of monoculture wheat were respectively 26.79%, 27.12% and 36.30% ($P=0.001$, $P=0.033$, $P=0.050$) higher than that of the intercropping wheat. The average fruit yield of intercropping and monoculture walnut were respectively 0.88 kg and 0.94 kg per tree ($P=0.829$). However, yield LER (Land equivalent ratio) and WUE_e (WUE of economics) of the walnut-wheat intercropping system respectively reached 1.67 and 25.92RMB·mm⁻¹·hm⁻², improved obviously comparing with monoculture system. The walnut-wheat intercropping system utilized water with high efficiency and exhibited both production advantage and economic advantage at the same time.

Key Words: walnut-wheat intercropping system; $\delta^{13}\text{C}$; WUE; water use; grain yield; LER; WUE_e.

农林复合系统通过林木和作物配置,能使物种间生态互补、充分利用水肥光热等资源、提高系统的生态及经济效益。但随着林木根系和冠幅增长,林木和作物可能存在资源竞争,尤其在温带半干旱地区地下部分水分竞争更为突出^[1]。复合农林业是华北低丘山区林业生态工程建设的重要内容之一,果农复合模式是其中一大主要类型^[2]。而该区气候干旱、土层瘠薄、灌溉条件较差,水资源短缺制约了农林业的持续发展。开展华北低丘山区农林复合系统各组分的水分利用效率和耗水量等种间水分关系研究,对该区发展节水高效、持续稳定的复合农林业具有重要意义^[3]。

植物水分利用效率(water use efficiency, WUE)是指植物生理活动过程中消耗水形成有机物质的基本效率,是评价植物水分利用和抗旱特性一个重要指标^[4]。目前 WUE 的测算方法有收获法(生长季内植物收获干重与田间耗水量的比值)、光合仪法(光合和蒸腾之比)、微气象法和稳定碳同位素法等。由于破坏性太大^[5],传统的收获法不适宜用来估算果农复合系统水分利用;并且研究区域属石质山区梯田,下垫面不均一、土层厚度仅 80 cm 左右,也无法通过水分平衡法、彭曼法以及近年来随着微气象学理论发展起来的涡度相关法等计算田间耗水量和 WUE。而常规的光合仪法只能进行短期及瞬时的蒸腾量和 WUE 研究、很难与植物的最终生产力和田间实际值联系起来^[6-7]。最主要的是上述方法无法区分开复合系统果树和作物的耗水量和耗水比率。

稳定碳同位素技术是植物生理生态学研究中的新方法,且其可靠和稳定性已得到充分证实^[6,8-11]。由于植物组织的碳是在一段时间(如整个生长期)内累积起来的,其稳定碳同位素组成(Stable carbon isotope ratio, $\delta^{13}\text{C}$)可以指示截至采样时植物生活过程的平均 WUE。且该方法只需采集少量植物材料,不受时间、地点和下垫面情况等条件的限制,方便保存和测定。木质部茎流测量系统则是目前广泛用于量化整株木本植物水分利用的方法^[12-15]。采用稳定碳同位素技术和 TDP(热消散探针法, Thermal dissipation probe)方法能简化对复

合系统水分利用的测定过程^[16],而稳定碳同位素技术研究林农复合系统的水分利用尚比较少见。本文试图在冬小麦不同生育期内研究核桃-小麦复合系统和单作小麦的植物组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和采用 TDP 法量化核桃的树干液流,结合生物量和气象数据资料计算出各植物组分的 WUE 和耗水量 (Water use, WU), 以期为华北低丘山区农林复合系统的水分管理提供理论依据,并可丰富稳定碳同位素技术的应用和农林复合系统水分关系研究方法。

1 试验材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在河南省济源市境内的黄河小浪底森林生态系统定位研究站内 ($35^{\circ}01' \text{ N}$, $112^{\circ}28' \text{ E}$), 试验区地处太行山南段南麓,属暖温带大陆性季风气候。全年日照时数为 2367.7 h,年日照率为 54%,多年平均 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 活动积温为 5282 $^{\circ}\text{C}$ 。平均降雨量 641.7 mm, 主要分布在 6—9 月份 (占全年的 68.3%)。试验区土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐色土为主, 土层厚度 50—80 cm, pH 值 7.65—8.5, 石砾含量为 10%—18%, 有机质含量为 8.28—16.50 g/kg, 速效氮含量 21.4—80.0 mg/kg, 速效磷含量 2.77—8.16 mg/kg, 速效钾含量 77.44—97.98 mg/kg。

1.2 材料与方法

1.2.1 试验材料

研究对象为水平梯田核桃 (*Juglans regia* L.)-小麦 (*Triticum aestivum*) 间作系统、单作核桃和单作小麦。梯田东西向长 140 m、南北宽 20 m, 西侧为核桃小麦-间作系统, 东侧为单作核桃。核桃树种植于 2006 年初, 林带行向为东西向, 株行距为 3 m $\times$ 4 m。核桃平均树高 4.85 m, 地径 9.06 cm, 东西和南北冠幅分别为 3.3 m 和 3.47 m。小麦品种为焦豫 6 号, 于 2009 年 10 月中旬播种、2010 年 6 月初收获, 行距 20 cm, 整个生育期无灌溉补水措施。间作小麦距离核桃南北侧树行均为 60 cm。单作小麦位于间作模式附近的梯田地块中, 与间作小麦的管理措施相同。

1.2.2 试验布置

选择试验地块中部正常生长的 1 棵核桃及其周围间作小麦作为 1 个试验小区, 分别在距离核桃树行北侧 60、190 cm 和南侧 60 cm 处的行间设置小麦测点 (图 1), 共设 3 个试验重复。

1.2.3 观测内容及方法

(1) 气象因子和土壤含水量观测

小气候自动观测系统位于间作系统和单作系统中中间位置 1 m 高度处, 在整个小麦生育期连续观测空气温度 (T_a) 和相对湿度 (RH) (HMP45C, Vaisala, Finland)、降雨量 (P) (RM Young, Inc) 等气象数据, 数据采集器为 CR23X (Campbell 公司, 美国)。每 2 min 采集 1 次, 每

10 min 输出 1 组平均值。采用土壤湿度自动观测系统分别测定单作小麦和核桃-小麦间作系统中核桃树下 (NS0) 以及距离核桃树北侧 50 cm (N50)、200 cm (N200) 和南侧 50 cm (S50) 处 0—80 cm 土层的土壤容积含水量, 每 10 cm 一层。土壤水分传感器 ECH_2O (Avalon Sci. Inc., USA), 数据采集器为 AR5-8A-SE (Avalon Sci. Inc., USA)。每 30 min 采集 1 次。

(2) 稳定碳同位素的测定

于小麦返青期、拔节期、灌浆期、成熟期 4 个时期对核桃和小麦取样, 用于测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值和计算 WUE。取样时, 核桃树分别东、南、西、北 4 个方位, 数据取 4 个方位的平均值。在小麦返青期, 核桃树还未发芽, 所取样品为 1 年生去皮枝条; 而在小麦拔节期核桃树刚长叶, 所取为嫩叶。小麦按照 1.2.2 中布置的采样点分别根、

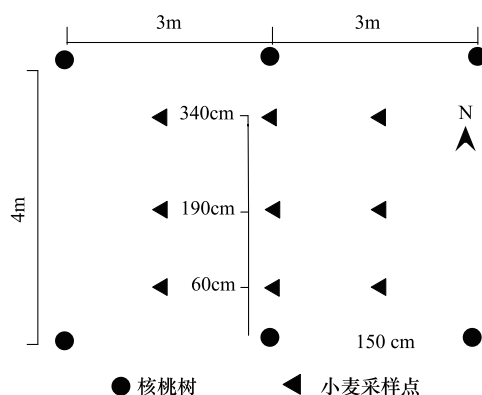


图 1 试验区采样点布置示意图

Fig. 1 Sampling spots in the field

茎、叶(取旗叶)进行取样,每个样品为15株小麦的混合样。样品在70℃烘箱中烘干48 h,粉碎过80目筛,在中国林科院稳定同位素比率质谱实验室分析,取处理好的样品3—5 mg在元素分析仪(Thermo Scientific Flash1112 HT,美国)中高温氧化还原为CO₂,质谱仪(DELTA V Advantage Isotope Ratio Mass Spectrometer)检测CO₂中的C得到样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 值,测定精度为0.1‰。同时用小气泵取单作和复合系统中0.5 m高度的空气样品装入气体采样袋中用于分析空气的CO₂浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值,每样品3个重复。空气CO₂浓度采用气相色谱仪(Agilent6820)、火焰离子化检测器(FID)测定,分析精度为5‰;空气 $\delta^{13}\text{C}$ 值在中科院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室用质谱仪(MAT253)采用高温燃烧法测定。植物和空气 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定以PDB(Pee Dee Belemnite)为标准,根据下面公式计算^[8]:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}} \quad (1)$$

式中, $\delta^{13}\text{C}$ 表示样品 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 与标准样品偏离的千分率, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}$ 表示标准物质PDB的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 。

(3) 树干液流观测

选择5棵核桃树的东、南、西、北4个方向,采用热扩散树干液流法测定树干液流(探头为Dynamax公司,美国),传感器(探针)长度为30 mm、安装位置距离地面20 cm,数据采集器为CR10X。液流测算公式^[15,17-18]如下:

$$F_d = 118.99 K^{1.231} \quad (2)$$

$$F_s = F_d \times SA \times 3.6 \quad (3)$$

$$K = \frac{dT - dT}{dT} \quad (4)$$

$$SA = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (5)$$

式中, F_d 为液流密度($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); F_s 为树干液流速率(L/h); K 为无量纲参数; dT 为某时刻两个探针的温差值, dTM 为一日内最大温差值; SA 为边材面积(cm^2), D 为去皮直径(cm), d 为髓心直径(cm)。数据取5棵树的液流平均值,将单株蒸腾速率按时间积分得到单株蒸腾耗水量,结合核桃栽培密度833株/ hm^2 ,得到单位面积核桃蒸腾耗水量。为避免损伤被测木,于试验结束后在被测木周围选择6棵与被测木胸径接近的树木,用生长锥测定距地面20 cm处的边材、心材,平均后确定边材面积。数据采集器型号和输出时间步长与小气候自动监测系统同步。

(4) 产量性状调查

在小麦返青期、拔节期、扬花-灌浆期和成熟期4个时期测定小麦的生物量。小麦成熟后,在1.2.2中布置的取样点各选取50 cm长、20 cm宽小麦调查生物量、产量、收获指数HI(产量和生物量的比值)、千粒重、单株麦粒数、株高和单位面积的麦株数等,将穗、根、茎、叶分别烘干测定生物量、 $\delta^{13}\text{C}$ 值和碳含量(质谱仪法随同样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值同时测出)。在核桃收获期分别对间作核桃和单作核桃统计单株核桃产量。

(5) 水分利用效率和耗水量等的计算

根据^[6,8-16]等人的研究:

$$\text{WUE} = \frac{(1-\phi)Ca(b-\delta a+\delta p)}{(b-a)} \quad (6)$$

式中, a 、 b 分别为CO₂扩散和羧化过程中的同位素分馏系数,其中 $a=4.4$ ‰, $b=27$ ‰; C_a 大气CO₂浓度; δa 和 δp 分别为空气和植物材料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值;数值1.6为水蒸汽和CO₂在空气中的扩散比率。 Φ 为植物整个生长期叶片夜间呼吸和其他器官呼吸消耗掉的碳的比率,取 $\Phi=0.3$ ^[19]。VPD为叶片内外蒸汽压差(Vapor pressure deficit),由植物生长过程中取样日期前一段的平均日(7:00—17:30)气象数据(T_a 、 RH 等)计算得出^[20-21]:

$$\text{VPD} = E - e \quad (7)$$

$$E = 0.611 \times 10^{17.502T/(240.97+T)} \quad (8)$$

$$RH = \frac{e}{E} \times 100\% \quad (9)$$

$$VPD = 0.611 \times 10^{17.502T/(240.97+T)} \times (1 - RH) \text{ (kPa)} \quad (10)$$

T 为叶片温度,根据 Allen^[22]的研究,气温每升高 1 °C,叶片温度升高 0.72 °C; RH 为大气相对湿度;0.611 为 $t=0$ °C 时纯水平面上的饱和水汽压; e 为实际水汽压; E 为同温度下的饱和水汽压。

同时, WUE 又是植物在一段时间内同化的碳总量与总耗水量 (Water use, WU , kg/m^2) 的比值,可根据各个器官的生物量干重 (Dry weight, DW , g) 和含碳率 (Carbon content, CC , mg/g 干重) 计算出干物质碳含量,即:

$$WUE = \frac{DW \times CC}{WU} \quad (11)$$

将(6)式中, WUE 的单位 $\text{mmol C/mol H}_2\text{O}$ 换算成 $\text{mg C/g H}_2\text{O}$,代入公式(11)即计算出单位面积的实际耗水量 WU 。

产量土地当量比 (Land equivalent ratio, LER) 和产值水分利用效率 (WUE of economics, WUE_e) 计算^[23]:

$$LER = Y_1 / Y_1' + Y_2 / Y_2' \quad (12)$$

式中, Y_1 和 Y_2 分别为间作小麦和间作核桃的单位面积的产量; Y_1' 和 Y_2' 为单作小麦和单作核桃单位面积的产量。

$$\text{产值水分利用效率} = \text{单位面积经济产值} (\text{元}/\text{hm}^2) / \text{耗水量} (\text{mm}) \quad (13)$$

1.2.4 数据分析

采用 EXCEL 和 SPSS18.0 统计软件对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 气象因子和土壤含水量变化

2009—2010 年冬小麦生育期内气象因子结果如下 (图 2): 冬季日均温为 2.28 °C, 生长季的平均气温为 16.62 °C; 整个生育期降雨 199.9 mm, 不到年均降雨量的 1/3; 其中, 播种至冬前期为 77.4 mm、返青前 45.7 mm、返青至拔节期 3.6 mm、孕穗至灌浆期 57.6 mm、乳熟至成熟期 6.5 mm; RH 受降雨影响大、冬季稍低; 日均 VPD 与温度变化趋势大概一致, 冬季小、生长季大、雨天降低。

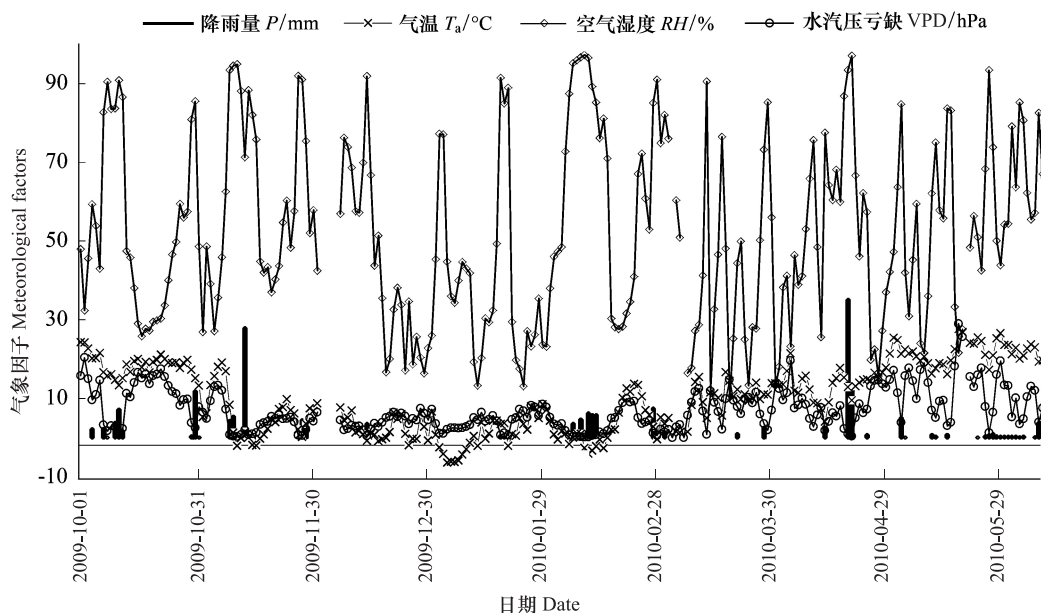


图2 冬小麦生育期内气象因子变化

Fig. 2 Changes of meteorological factors during winter wheat growth period

由图 3 可见,单作系统的土壤含水量在小麦整个生育期都明显低于间作系统的,单作小麦消耗水分多,核桃树冠遮荫有效减少了间作系统的土壤蒸发。单作系统在拔节期(4—10 日)之前、间作系统在孕穗期(4—20 日)之前的土壤含水量变化较小,小麦耗水量较少。尽管 4 月 20—21 日的一场 48.3 mm 的降雨大大补充了土壤水分,但在随后的小麦扬花—灌浆期(4 月 21—5 月 12 日)土壤水分消耗最快,耗水量多。间作系统内距离核桃树不同位置处的土壤含水量的差异为浅层土(0—40 cm)较大、深层土(40—80 cm)较小;距离核桃树越近浅层土含水量越高(NS0>N50>S50>N200),而深层土则是除了小麦扬花—灌浆期(4 月 21—5 月 12 日)NS0 的土壤含水量最高外,其他时期都是 NS0 最低、N200 最高,说明核桃树主要吸收深层水、在扬花—灌浆期消耗水分也较少,而间作小麦主要吸收浅层水,且距离核桃树越远树冠遮荫减少、地表蒸发也越大。

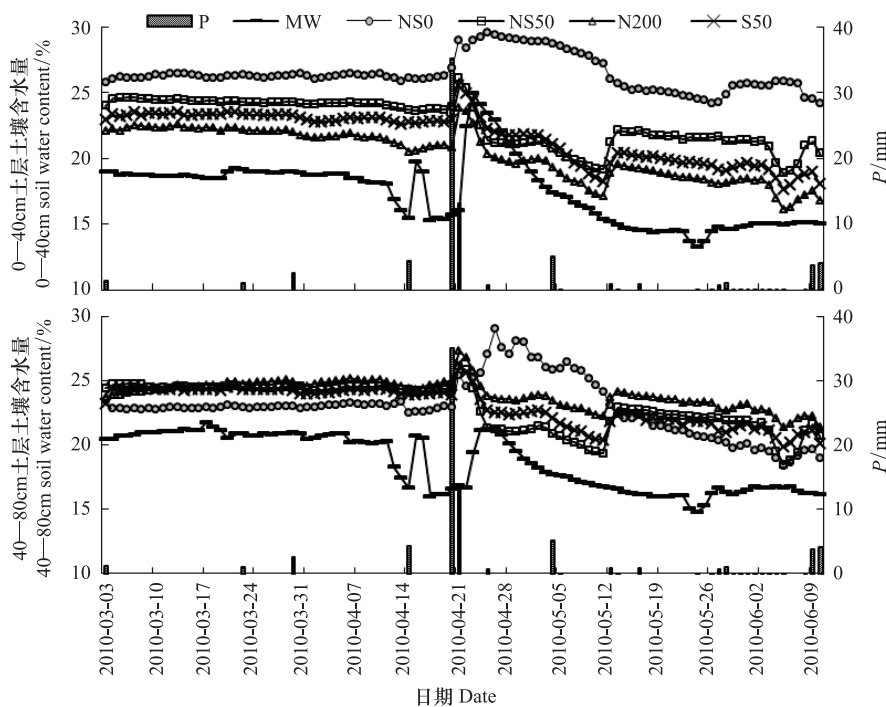


图 3 冬小麦生育期内核桃-小麦间作系统和单作小麦土壤含水量变化

Fig. 3 Changes of soil volumetric water content in the walnut-wheat intercropping system and monoculture wheat system during winter wheat growth period

MW 单作小麦 Monoculture wheat; NS0、NS50、N200、S50 分别为核桃树下、距离核桃树北侧 50cm、200cm 和南侧 50cm 处的土壤含水量

2.2 核桃与小麦 WUE 差异

间作核桃树、单作小麦和间作小麦的 WUE 分别为 10.771—21.233、9.946—19.149、9.878—18.431 mmol C/mol H₂O (图 4), 季节变化均是在小麦返青期>拔节期>成熟期>扬花—灌浆期, 除单作小麦在拔节期和成熟期差异不显著外, 其他生育期间均两两差异显著 ($P=0.000$)。间作核桃的 WUE 在小麦的各个生育期 (除成熟期与单作小麦差异不显著) 都显著高于小麦的 ($P=0.000$)。单作小麦的 WUE 在拔节期显著小于间作小麦。而间作系统内距离核桃不同位置的小麦的 WUE 差异不显著 (图 5)。

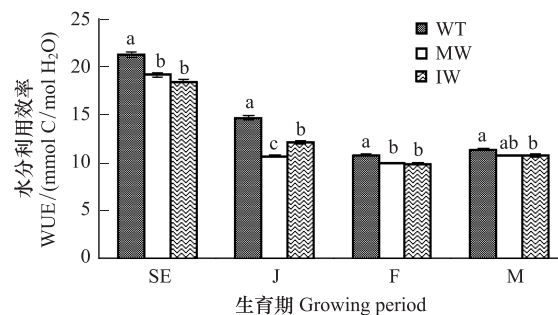


图 4 核桃和小麦 WUE 的差异

Fig. 4 Difference of walnut tree and wheat in WUE
IW 间作小麦 Intercropping wheat; WT 核桃树 Walnut tree; SE 返青期 Seedling establishment period; J 拔节期 Jointing period; F 灌浆期 Filling period; M 成熟期 Maturing period

2.3 间作系统和单作系统耗水的差异

核桃-小麦间作系统总耗水量为 1755.19 t/hm²,比单作小麦(2538.13 t/hm²)少 30.85%。间作核桃、间作小麦和单作小麦在小麦生长前期、拔节期、扬花—灌浆期和灌浆—成熟期(下文顺序相同)4 个生育期的耗水量分别为 190、110.04、171.94、165.80 t/hm²,115.99、247.19、311.26、442.97 t/hm²和 255.56、689.94、580.90 和 1011.73 t/hm²。核桃-小麦间作系统的耗水量除了返青期,在其他 3 个生育期都显著小于单作小麦的($P=0.006, 0.046, 0.050$)。

2.4 核桃-小麦间作系统不同组分耗水的差异

间作核桃树在整个小麦生育期内的总耗水量占核桃-小麦间作系统总耗水量的 36.34%,其中在小麦 4 个生育期分别占 62.09%、30.80%、35.58% 和 27.24%。核桃树在小麦的生长前期耗水所占比例最多、在小麦生长后期所占比重变小。小麦则越往生长后期需水量越多,即生长前期<拔节期<扬花—灌浆期<灌浆—成熟期,且季节间差异均显著($P=0.000$)(图 6)。间作小麦的耗水量为 N60 最多、S60 最少(图 5)。

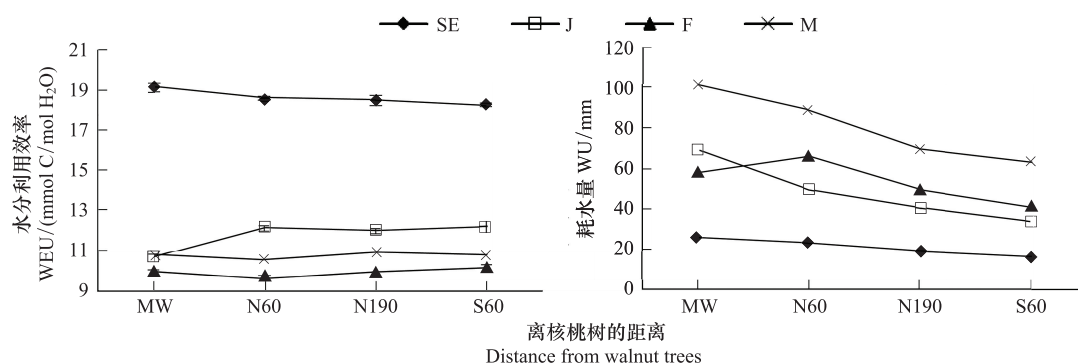


图 5 离核桃树不同距离处间作小麦的 WUE 和耗水量差异

Fig. 5 WUE and water use of wheat at different distance from intercropping walnut trees

N60、N190、S60 分别为距离核桃树北侧 60cm、190cm 和南侧 60cm 处

2.5 产量性状和水分利用效果

单作小麦的产量、总生物量、千粒重和单位面积的小麦株数都显著高于间作小麦的($P=0.001, 0.033, 0.006, 0.018$)、麦粒数和 HI 则差异不显著,其中产量和总生物量分别高出 26.79% 和 27.12% (表 1)。间作核桃和单作核桃的单株果实产量分别为 0.88 kg 和 0.94 kg($P=0.829$)。

核桃-小麦间作系统的产量 LER 达到 1.67,比单作效率明显提高,增产率达 67%。以核桃和小麦价格分别为 50 和 1.8 元/kg 估算出核桃-小麦间作系统和小麦单作系统的 WUE。分别为 25.92 和 4.76 元·mm⁻¹·hm⁻²,前者是后者的 5.45 倍。

3 讨论

华北低丘山区气候干旱、灌溉条件较差,水分是限制该区农林业发展的主要因子。在本研究中整个小麦生育期降水较少,造成水分缺乏,由于水分亏缺条件下植物会提高水分利用效率^[10,16],间作小麦在拔节期 WUE 显著高于单作小麦可能是由于在此时期小麦快速生长,间作核桃树也正处于发芽长叶期,需水增多,核桃与小麦可能产生水分竞争。灌浆和成熟期间作小麦和单作小麦的 WUE 差异不明显,除了这一时期降雨稍多、补充了水分,另一个重要原因可能是此时核桃已经形成

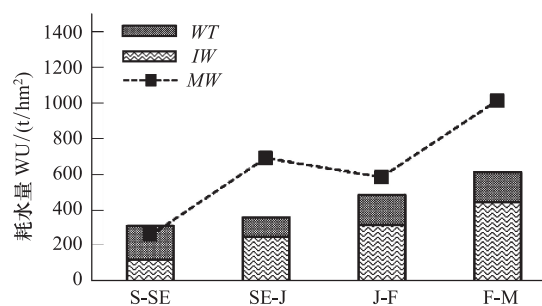


图 6 核桃-小麦间作系统和单作小麦耗水量

Fig 6 Water use of walnut-wheat intercropping system and monoculture wheat

S-SE 播种-返青期 Sowing-seedling establishment; SE-J 返青-拔节期 Seedling establishment-jointing; J-F 拔节-灌浆期 Jointing-filling; F-M 灌浆-成熟期 Filling-maturing

树冠遮荫,有效的减少了地表水分散失、增加空气湿度、降低叶温、气温以及 VPD ,改善了间作系统的小气候和土壤水分状况,从而减轻水分亏缺对间作小麦的影响^[24-25],对土壤水分监测得出的单作小麦的土壤含水量在小麦整个生育期都明显低于间作系统的也证实了单作小麦的水分消耗远大于复合系统小麦的。

表 1 复合系统和单作系统产量性状和水分利用效果

Table 1 Yield indices and water use effect in intercropping and monoculture systems

IM	GY	TGW	TB	WH	GN	PNP	HI	LER	WUE _e
MW	6.71±0.58	55.06±1.93	3.96±0.12	76.73±1.99	29.22±2.56	420.29±36.32	0.169±0.01	1	4.76
WIW	4.91±0.50	46.88±0.47	2.89±0.31	67.88±1.86	29.44±1.91	355.56±32.84	0.169±0.01	1.67	25.92
Sig.	0.001	0.006	0.033	0.000	0.083	0.018	0.938	—	—

GY:产量 Grain yield(t/hm); TGW:千粒重 Thousand-grain weight(g); TB:总生物量 Total biomass(kg/m²); WH:麦株高 Wheat height(cm); GN:单株麦粒数 Grain number; PNP:单位面积小麦株数 Plants number per area(No/m²); HI:收获指数 Harvest index; LER:产量土地当量 Land equivalent ratio; WUE_e:产值水分利用效率 WUE of economics (元·mm⁻¹·hm⁻²).

返青期前间作系统的耗水量略大于单作系统则是由于此时期小麦刚出苗,生长量小,地表裸露,地面蒸发量较大,核桃树则还在继续生长,造成复合系统总耗水较多。而核桃-小麦间作系统相对单作小麦明显减少了总的水分消耗。

核桃耗水量仅占间作系统总耗水量的 36.34%,在小麦的生长前期所占比例最多、在小麦旺盛生长期所占比重较小,而小麦从扬花期往后土壤水分消耗加快、耗水量也越来越多,表现为越往生长后期需水越多,核桃刚好与间作小麦的需水期错开,充分利用了生态位,在时间上避免用水竞争。距离核桃树越近浅层土壤含水量越高、而深层土越低,核桃树下的土壤含水量在整个小麦生育期都明显高于间作系统中其他部位的,表明核桃主要吸收深层水,而间作小麦主要吸收浅层水,也从位置上避免水分竞争。且距离核桃树越远树冠遮荫减少、地表蒸发也越大,造成浅层土壤含水量降低。

间作小麦 N60 的耗水量最多、S60 处最少,应该与核桃树的根系分布有关,孙守家等^[3]对该地块核桃根系的调查结果表明在 0—40 cm 土层深度内、也就是小麦根系的主要分布层,核桃根系的根长密度核桃树南侧 50 cm(469.03 cm/dm³)最多、中间次之(363.11 cm/dm³),北侧 50 cm 最少(323.03 cm/dm³),而核桃根系分布越多、与小麦的水分竞争也越大,导致树行南侧小麦能吸收的水分也最少。

尽管单作小麦的产量、总生物量等都高于间作小麦、单作核桃的果实产量也略大于间作核桃。但核桃-小麦间作系统的产量 LER 和 WUE_e 分别达到 1.67 和 25.92 元·mm⁻¹·hm⁻²,土地当量比和产值水分利用效率比单作系统明显提高、同时具备生产优势和经济优势。

4 结论

华北低丘山区株行距 3 m × 4 m 的核桃-小麦间作系统在果树的第 4 年、树冠几乎郁闭的情况下,核桃和小麦在时间和空间上都错开需水期,相对单作系统显著降低了系统的耗水量,产量土地当量和产值水分利用效率比单作的效率都明显提高,水资源获得高效利用,因此适宜发展。在核桃树完全郁闭后可种植耐阴作物或药材等,以最大限度的发挥复合系统的经济和生态效益。

References:

- [1] Mao R, Zeng D H. Research advances in plant competition in agroforestry systems. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2): 379-386.
- [2] Zhang J S, Meng P. Simulation on water ecological characteristics of agroforestry in the hilly area of Taihang Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1172-1178.
- [3] Sun S J, Meng P, Zhang J S, Huang H, Wan X C. Deuterium isotope variation and water use in an agroforestry system in the rocky mountainous area of North China. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3717-3726.
- [4] Bohn B A, Kershner J L. Establishing aquatic restoration priorities using a watershed approach. Journal of Environmental Management, 2002, 64(4): 355-363.
- [5] Pieters A J, Núñez M. Photosynthesis, water use efficiency, and $\delta^{13}C$ in two rice genotypes with contrasting response to water deficit.

- Photosynthetica, 2008, 46(4): 574-580.
- [6] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40(1): 503-537.
- [7] Wang J L, Yang X M, Fang Q X. The expatiation on measuring method of field water use efficiency in different scale. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 77-80.
- [8] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9(2): 121-137.
- [9] Yan C R, Han X G, Chen L Z. Water use efficiency of six woody species in relation to micro-environmental factors of different habitats. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1952-1956.
- [10] Anyia A O, Slaski J J, Nyachiro J M, Archambault D J, Juskiw P. Relationship of carbon isotope discrimination to water use efficiency and productivity of barley under field and greenhouse conditions. Journal of Agronomy and Crop Science 2007, 193(5): 313-323.
- [11] Chen J, Chang S X, Anyia A O. The physiology and stability of leaf carbon isotope discrimination as a measure of water-use efficiency in barley on the Canadian prairies. Journal of Agronomy and Crop Science, 2011, 197(1): 1-11.
- [12] Smith D M, Allen S J. Measurement of sap flow in plant stems. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(12): 1833-1844.
- [13] Köstner B, Granier A, Cermák J. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. Annual Forest Science, 1998, 55(1/2): 13-27.
- [14] Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A, Dye P J. A review of whole-plant water use studies in trees. Tree Physiology, 1998, 18(8/9): 499-512.
- [15] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631-646.
- [16] Farquhar G D, Richards R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11(6): 539-552.
- [17] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [18] Granier A, Huc R, Barigash S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78(1/2): 19-29.
- [19] Evans J R. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Physiology, 1983, 72(2): 297-302.
- [20] Abbate P E, Dardanelli J L, Cantarero M G, Maturano M, Melchiori R J M, Suero E E. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. Crop Science, 2004, 44(2): 474-484.
- [21] Hu J, Moore D J P, Riveros-Iregui D A, Burns S P, Monson R K. Modeling whole-tree carbon assimilation rate using observed transpiration rates and needle sugar carbon isotope ratios. New Phytologist, 2010, 185(4): 1000-1015.
- [22] Allen L H, Pan D Y, Boote K J, Pickering N B, Jones J W. Carbon dioxide and temperature effects on evapotranspiration and water use efficiency of soybean. Agronomy Journal, 2003, 95(4): 1071-1081.
- [23] Huang W, Zhang J H, Li W H, Zhang L F. Moisture effect analysis of pumpkin and oil sunflower intercropping in semi-arid area of northwest Hebei Province. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 4072-4081.
- [24] Holmgren M. Combined effects of shade and drought on *tulip poplar* seedlings: trade-off in tolerance or facilitation? Oikos, 2000, 90(1): 67-78.
- [25] Quero J L, Villar R, Marañón T, Zamora R. Interactions of drought and shade effects on seedlings of four *Quercus* species: physiological and structural leaf responses. New Phytologist, 2006, 170(4): 819-834.

参考文献:

- [1] 毛琰, 曾德慧. 农林复合系统植物竞争研究进展. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 379-386.
- [2] 张劲松, 孟平. 农林复合系统水分生态特征的模拟研究. 生态学报, 2004, 24(6): 1172-1178.
- [3] 孙守家, 孟平, 张劲松, 黄辉, 万贤崇. 华北石质山区核桃-绿豆复合系统氮同位素变化及其水分利用. 生态学报, 2010, 30(14): 3717-3726.
- [7] 王建林, 杨新民, 房全孝. 不同尺度农田水分利用效率测定方法评述. 中国农学通报, 2010, 26(6): 77-80.
- [9] 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝. 六种木本植物水分利用效率及其小生境关系研究. 生态学报, 2001, 21(11): 1952-1956.
- [23] 黄伟, 张俊花, 李文红, 张立峰. 冀西北坝上旱半干区南瓜油葵间作的水分效应. 生态学报, 2011, 31(14): 4072-4081.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 7 April, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research	SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)
Response of sinapate esters in <i>Arabidopsis thaliana</i> to UV-B radiation	LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)
Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by <i>Chlorella pyrenoidsa</i> and its influential factors	JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)
Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels	HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)
An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems	SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)
Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province	ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)
Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province	BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)
Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus <i>Chaetomium globosum</i> L18 from <i>Curcuma wenyujin</i>	WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)
Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China	HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau	ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)
Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification	LI Yilin (2066)
Effects of <i>Eriosoma lanigerum</i> (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars	WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)
Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community	JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)
Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China	XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)
Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province	WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)
The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China	GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)
Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin	ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)
Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange (<i>Poncirus trifoliata</i>) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination	XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)
The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of <i>Chrysanthemum</i> leaves	YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)
Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China	LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)
Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau	ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)
Life history and spatial distribution of a <i>Taiwania flousiana</i> population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China	CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)
The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy	ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)
Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS	XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)
Early nitrogen deposition effects on CO ₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil	WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)
Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)
Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp (<i>Cyprinus carpio</i>) in Xiaolangdi Reservoir	SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)
Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method	TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)
Host searching behaviour of <i>Apanteles cypris</i> Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ...	ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)
The effect of hedgerows on the distribution of <i>Harmonia axyridis</i> Pallas in agroforestry systems	YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)
Induction of early resistance response to <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>mali</i> in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ...	WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping, et al (2239)
Review and Monograph	
Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change	WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)
Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species <i>Sonneratia apetala</i>	PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)
Discussion	
Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors	YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al (2271)
Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species	YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)
Scientific Note	
Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China	LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)
Effects of <i>Meloidogyne incognita</i> on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ...	LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元