

晋西苹果—大豆间作土壤水分的时空分布特征

高路博^{1,2}, 毕华兴¹, 许华森¹, 廖文超¹, 潘迪¹, 次仁曲西¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 选取晋西黄土区典型的苹果(*Malus pumila*)—大豆(*Glycine max*)间作系统为研究对象, 在大豆的关键物候期对间作系统和对照单作的土壤水分、大豆生长状况和产量进行了定位监测。研究结果表明: (1) 不同物候期, 间作系统土壤平均含水量变化显著, 苹果树和大豆对土壤水分竞争的空间区域和强度也有明显差异, 土壤水分耗用最大的时期为大豆开花期; (2) 水平方向上, 各个物候期间作系统土壤含水量均随着与树行距离的增加而增加, 最低值出现在距离果树行最近的区域; (3) 垂直方向上, 在大豆的苗期和结荚期间作系统土壤含水量随土壤深度的增加而递增, 在开花期, 土壤含水量随着土壤深度的增加出现先减小后增加的趋势; (4) 当前树龄下, 苹果—大豆间作系统的水分效应相对于大豆单作, 整体表现为负效应, 并对间作大豆的生物量和产量有着一定的负面影响。基于苹果—大豆间作系统土壤水分在不同物候期的分布特征, 建议采取适当的管理措施以缓解种间水分竞争并提高大豆的产量。

关键词: 苹果—大豆间作; 土壤水分效应; 时空分布; 晋西黄土区

文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2014)06-0327-05

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.063

Spatio-temporal Distribution of Soil Moisture in Apple—Soybean Intercropping System on Loess Plateau of West Shanxi Province

GAO Lu-bo^{1,2}, BI Hua-xing¹, XU Hua-sen¹, LIAO Wen-chao¹, PAN Di¹, Ciren Quxi¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: Abstract: By taking apple—soybean intercropping system on the loess region of West Shanxi Province as the research object, the soil moisture content, biomass and yield of soybean were tested at different key phenophases. The results indicated that: (1) The soil moisture of apple—soybean intercropping system changed significantly in different phenophases, and the maximum consumption period for soil moisture was the flowering period of soybean. In different phenophases, the main competitive area and the degree of competition for soil moisture between apple trees and soybean were significantly different; (2) In horizontal direction, the soil moisture content increased with increase of the distance from the tree base, and the lowest soil moisture content was the area adjacent to the tree base; (3) In vertical direction, the soil moisture increased with the increase of soil depth in both of the intercropping system and soybean monoculture plots at soybean seedling stage and bearing pod stage. In the flowering stage of soybean, with the increase of soil depth, soil moisture decreased at first and then increased with the increase of depth; (4) Compared with monoculture plots, an overall negative soil moisture effect appeared in apple—soybean intercropping system and resulted in the loss of soybean production. Due to the soil water distribution in different phenological periods of apple—soybean system, the authors recommended that the appropriate regulation and management measures should be taken to alleviate interspecific competition for moisture and to improve soybean yields.

Keywords: apple—soybean intercropping system; soil moisture effect; spatio-temporal distribution; Loess Plateau of West Shanxi Province

收稿日期: 2013-12-10

修回日期: 2013-12-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“果农间作系统林下太阳辐射时空分布及其对间作作物的影响”(31470638); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD38B02)

作者简介: 高路博(1986—), 男(汉族), 河南省鲁山县人, 博士, 主要研究方向为林业生态工程。E-mail: gaolubo@163.com。

通信作者: 毕华兴(1969—), 男(汉族), 陕西省米脂县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事林业生态工程方面的研究。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn。

果农间作不仅能够减少水土流失、增加土地利用效率,同时具有较高的经济及生态收益,作为黄土区农林复合的主要模式之一得到了广泛应用^[1-3]。但是在果农间作系统中,水、肥、光等资源是有限的,因此果树和农作物之间必然会产生竞争,有可能对作物产量和经济收益产生不利影响,严重的甚至可能影响到整个系统的稳定性及可持续发展^[4-6]。一些相关研究^[7-8]发现,在湿润地区,林木与农作物地上部分的光竞争是降低作物产量的主要因素,而在干旱半干旱区种间竞争主要来自于林木与农作物根系对于有限的水、肥资源的争夺。晋西黄土区属于半干旱区,农田中土壤水分的唯一来源为天然降水,林木在对有限的土壤水分资源的竞争中处于优势地位,可能造成农作物产量的降低^[9]。因此,对果农间作系统土壤水分的时空分布特征进行分析研究,认识果树与农作物种群对于土壤水分的竞争与互补机理显得尤为重要,关系到果农间作系统在该地区的推广应用和可持续发展。目前,在晋西黄土区对于果农间作系统已进行了一些研究,但多以核桃树(*Juglans regia*)—农作物间作为主要研究对象,且树龄较大,此时间作系统的经济收益主要来自于果树,研究方法也多为以整个生长季或年为尺度对间作界面整体水分分布进行研究^[9-10]。本研究以晋西黄土区典型的苹果(*Malus pumila*)—大豆(*Glycine max*)间作系统作为研究对象,按照大豆的物候期布置试验,定位监测苹果—大豆间作系统及大豆单作的土壤水分含量,对其空间分布规律进行研究,并分析作物植株生长及产量对土壤水分状况的响应,以期充分发挥果农间作系统良好的经济、社会、生态效益,为研究区退耕还林政策的顺利实施,果农间作系统的可持续发展提供理论支持和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处山西省吉县,属于典型的黄土残塬沟壑区,地理坐标为 35°53′—36°21′N,110°27′—111°7′E,降水量季节分配差异显著,1991—2010 年 20 a 间年均降水量为 575 mm,其中 6—8 月约占全年降水量的 80%(463 mm),年均温度 10 ℃。土层深厚,土壤类型为均匀的黄土母质。研究区主要造林树种有苹果、核桃、刺槐(*Robinia pseudoscacia*)、杏(*Armeniaca vulgaris*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)等。

1.2 研究对象

在吉县东城乡柏东村选择苹果—大豆间作系统作为研究对象。苹果树栽植于 2008 年,株行距为

4 m×5 m,树行东西走向,株高 2.6 m,胸径 6.2 cm,冠幅 1.9 m,果树品种为同一品种矮化富士,采用相同砧木。大豆品种为晋豆 36,播种时间为 2012 年 5 月,种植行向与树行方向一致,株行距为 0.3 m×0.4 m,间作系统大豆栽植时距离树行 0.3 m。所有试验样地采用同样的生产管理措施,全年无灌溉。研究区 2012 年年内降水量分布如图 1 所示。

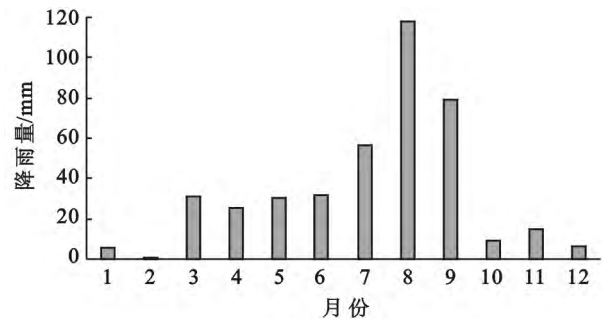


图 1 研究区 2012 年各月份降水量分布

1.3 研究方法

试验苹果—大豆间作地块以 9 棵果树为一个矩形样地,规格为 8 m×10 m,设置同样面积的大豆单作为对照,各设 3 个重复。每个苹果—大豆间作样地中,垂直中心苹果树行布设 3 条调查样线,每条样线含 6 个土壤水分监测点,分别位于树行的南北两侧,具体监测点布设如图 2 所示。按照与树行的距离不同,将采样点分为 3 组用以代表距离树行 0.5 m,1.5 m 和 2.5 m 处的土壤水分状况,并分别定义为处理 $T_{0.5}$, $T_{1.5}$ 和 $T_{2.5}$ 。每个大豆单作样地按照 S 形布设 5 个监测点采集土样。2012 年在大豆播种前(4 月 23 日)及大豆苗期(6 月 4 日)、开花期(7 月 14 日)、结荚期(8 月 11 日),在各采样点进行土壤水分定位监测,土钻法取土,20 cm 为一层,取土深度为 0—100 cm,采用烘干法测定土壤的质量含水量。

在果农间作系统中,由于果树和农作物根系生态位的重叠,对土壤水分产生竞争,导致其减少,产生亏损;另一方面,树木通过遮阴降低土壤水分蒸发,加之树木根系的提水作用,也会对土壤水分产生一定的增益作用。这种减少和增益的综合影响,使得土壤水分形成了新的平衡,这种综合影响的程度定义为果农间作系统的土壤水分效应。苹果—大豆间作系统的土壤水分效应计算公式为:

$$E = (M - M_c) / M_c \times 100\%$$

式中: E ——土壤水分效应(%); M ——间作系统 0—100 cm 的土壤含水量; M_c ——大豆单作 0—100 cm 的土壤含水量。当 E 为正值时,表示果农间作对

土壤水分影响整体表现为增益作用;当 E 为负值时,表示果农间作使土壤水分整体表现为降低作用。

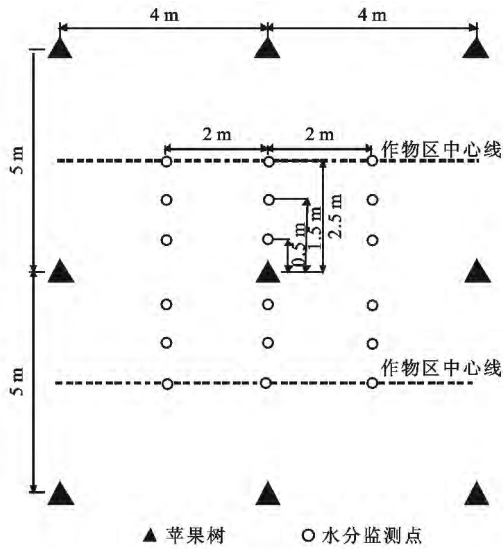


图 2 苹果+大豆间作系统土壤水分监测点布设

2012 年 8 月 20 日,在各土壤水分取样点的同一位置,选取健康的大豆植株,带回实验室处理,分别对其百叶干重、株高和地上部分生物量进行测定。在苹果—大豆间作地块,于生长季末(9 月下旬),在中心树行南北两侧分别收获 $4\text{ m} \times 2.7\text{ m}$ 的矩形样方大豆,为了便于研究,将这两个样方进一步划分为距离树行 $0.3\text{ m} \sim 1.0\text{ m}$ 的区域;距离树行 $1.0\text{ m} \sim 2.0\text{ m}$ 的区域和距离树行 $2.0\text{ m} \sim 3.0\text{ m}$ 的区域,用以分别代表 $T_{0.5}$, $T_{1.5}$ 和 $T_{2.5}$ 处大豆的产量。在大豆单作地块,大豆的收割面积为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 。所有收获的大豆经过脱粒后,在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒定质量,利用天平称重并换算为单位面积上大豆产量。

2 结果与分析

2.1 播种前土壤含水量分布

大豆播种前(4 月份)土壤含水量测定情况详见表 1。苹果—大豆间作和大豆单作各层土壤质量含水量的变异系数均小于 0.1,处于弱变异程度,并由上到下逐渐递减,同等深度土层苹果—大豆间作样地土壤含水量的变异系数略大于大豆单作样地。

在垂直方向上,大豆单作土壤含水量随着土壤深度的增加逐渐升高,苹果—大豆间作在(40—60 cm)土层的平均土壤含水量出现明显的降低,这主要是苹果树的根系分布及其吸水作用的结果^[11]。由于苹果—大豆间作系统内部小气候和果树冠幅的遮荫共同作用的影响^[12],苹果—大豆间作 0—40 cm 土层的土壤含水量稍高于大豆单作样地。方差分析表明,两

者在 0—100 cm 土层上的平均土壤含水量均未表现出显著差异($p > 0.05$)。

表 1 大豆播种前苹果—大豆间作及大豆单作不同土层土壤含水量

土层深度/cm	苹果—大豆间作		大豆单作	
	含水量/%	变异系数	含水量/%	变异系数
0—20	$13.48 \pm 0.08a$	0.043	$13.12 \pm 0.08a$	0.031
20—40	$14.39 \pm 0.11a$	0.043	$14.05 \pm 0.08a$	0.029
40—60	$13.73 \pm 0.09a$	0.031	$14.15 \pm 0.06a$	0.025
60—80	$14.32 \pm 0.09a$	0.026	$14.43 \pm 0.04a$	0.023
80—100	$14.45 \pm 0.05a$	0.027	$14.86 \pm 0.05a$	0.012
0—100	$14.09 \pm 0.05a$	0.015	$14.12 \pm 0.03a$	0.013

注:同行相同小写字母表示差异不显著($p > 0.05$)。

2.2 土壤水分空间分布特征

在不同物候期,研究区大豆单作和苹果—大豆间作系统的土壤含水量在生物因子和环境因子的共同作用下,空间分布特征呈现出较大差异。

2.2.1 土壤水分水平分布 在水平方向上,土壤水分的分布规律具有相似性,在同一物候期内,大豆单作 CK 在 0—100 cm 土层的平均含水量均最大,且土壤含水量大小依次为: $CK > T_{2.5} > T_{1.5} > T_{0.5}$ 。不同物候期 $T_{0.5}$ 的土壤含水量为 $11.86\% \sim 14.82\%$,与最高值 CK 相比,含水量降低了 $4.05\% \sim 11.81\%$ 。由图 3 可以看出,间作系统土壤含水量随着与果树行距离的增加逐渐升高并趋向于稳定。其原因主要是苹果根系在近树区域分布集中,对土壤水分的吸收能力强,大豆与苹果树在这一区域对于土壤中水分的竞争最为激烈;距离苹果树行较远的区域,苹果与大豆对于水分的竞争在一定程度上得到缓解,土壤含水量升高。

对 $T_{0.5}$, $T_{1.5}$, $T_{2.5}$ 和 CK 土壤水分平均含量进行方差分析,可以发现不同的物候期苹果树与大豆主要水分竞争的水平分布区域不同。大豆苗期, $T_{0.5}$ 和 $T_{1.5}$ 的土壤含水量分别比 CK 降低了 4.05% 和 1.82% ,差异显著,表明苹果与大豆的主要竞争区域为苹果树行两侧 1.5 m 的范围内。大豆开花期, $T_{0.5}$, $T_{1.5}$, $T_{2.5}$ 与 CK 相比分别降低了 11.82% , 10.81% 和 2.90% ,均表现出显著差异,表明这一时期,树行两侧 2.5 m 的范围内均为苹果和大豆的水分主要竞争区。大豆结荚期,各处理的土壤含水量均有不同程度的升高,水分竞争得到缓解, $T_{1.5}$ 和 $T_{2.5}$ 与 CK 相比,未表现出明显差异,苹果和大豆对土壤水分的主要竞争区域为树行两侧 0.5 m 范围。

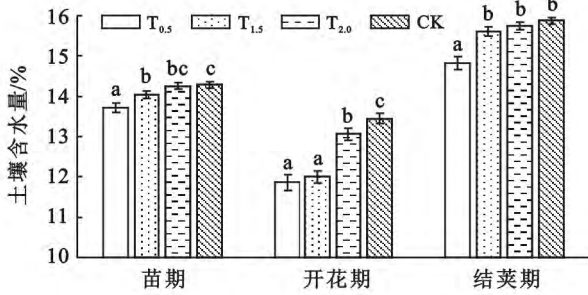


图 3 不同物候期各处理 0—100 cm 深度土壤平均含水量水平分布

注:同一系列相同的小写字母表示差异不显著($p>0.05$)。

2.2.2 土壤水分垂直分布 不同物候期,土壤水分的垂直分布规律不同(图 4)。在大豆苗期和结荚期,土壤平均含水量随着土壤深度的增加而递增,其垂直分布呈现出明显的梯度特征,在 0—100 cm 共 5 个土壤层次上,苹果—大豆间作的土壤含水量均在一定程度上低于大豆单作。方差分析结果表明,在大豆苗期,间作系统在 0—40 cm 土层的土壤含水量上与大豆单作有着明显差异,在大豆结荚期,间作系统的土壤含水量在 0—60 cm 土层上与大豆单作相比存在显著差异。开花期,间作系统土壤水分的垂直分布由上至下先减小然后增大,间作地土壤含水量的最低值为 11.20%,出现在 40—60 cm 土层,大豆单作土壤含水量的最低值为 11.42% 出现在 20—40 cm 土层,在 0—100 cm 深度上,间作系统和大豆单作表现出显著的差异。

土壤水分垂直分布差异与不同物候期苹果树、大豆的生理特性和该地区的降水规律有关。在大豆苗期,大豆根系分布较浅,加之该地区降水相对较少,土壤长期干旱缺水,土壤蒸发量大,0—20 cm 土层含水量的最低值就出现在该时期,苹果树与农作物对于土壤水分的竞争主要发生在 0—40 cm 土层,随着土层深度增加,竞争程度得到缓解,土壤含水量逐渐回升。

在大豆开花期,虽降水量较大,但多为短时局地雷暴降雨^[13],降水强度大于土壤入渗速率,发生超渗产流,加之地表结皮,使得降水更易产生地表径流而流失,深层的土壤水分无法得到补给,导致表层土壤(0—20 cm)含水量较高,深层土壤含水量低。同时,该时期太阳光照充足,苹果树与大豆生长旺盛,光合及蒸腾作用强烈,生理需水量大,对于土壤水分的竞争更为强烈,间作系统在整个土层深度上都表现出了与大豆单作的显著差异。在大豆结荚期,由于这一时期降水量的增多和降水历时增长,土壤水分得到了补充和恢复,整体含量相对于苗期和开花期有了明显增加。此外,树冠的遮荫和间作系统内部的降温、减风速等作用也在一定程度上对间作系统内部的土壤水分垂直分布产生了影响。

2.3 间作系统土壤水分效应

苹果—大豆间作系统的土壤水分效应值在大豆苗期、开花期、结荚期分别为-2.05%,-8.57%和-3.02%。即苹果—大豆间作系统在 0—100 cm 深度上土壤含水量相对于大豆单作在各物候期都表现为负效应,在大豆开花期表现的更为明显。产生这一现象的原因,一方面在于间作系统种间竞争中占优势地位的苹果树吸水根系与大豆根系均集中在 0—60 cm 的土层中,两者重叠的水分因子场^[14],导致了对于土壤中有限水分的激烈竞争;另一方面,间作系统的小气候效应和果树根系的提水作用^[3],也会一定程度上对土壤水分产生增益作用。在这种综合作用下,苹果—大豆间作系统中形成了土壤水分的新的平衡,并在一定程度上造成了土壤水分环境的恶化。由于本研究中的苹果树龄较小,林内小气候效应和树木群体的遮荫作用不够明显,因此对于苹果—大豆间作系统在研究区的经营管理还需在更长的时间尺度上进行观测,以更好地研究其规律并进行配置的优化。

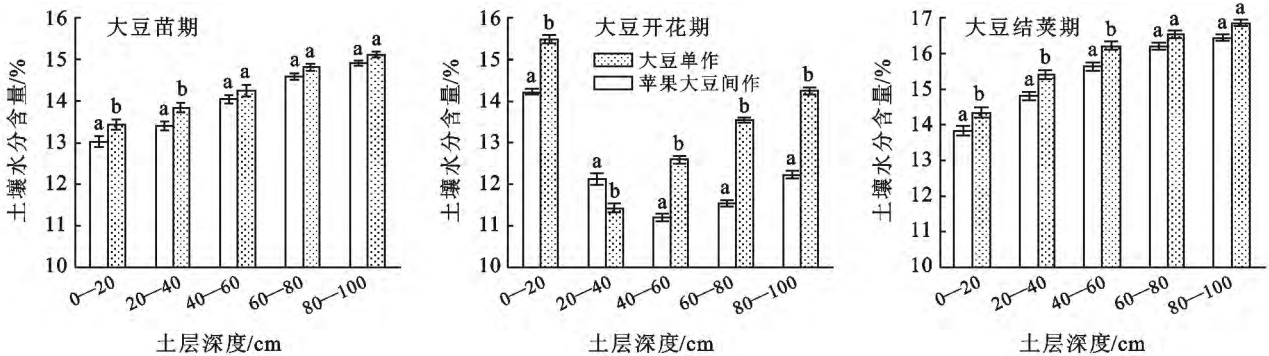


图 4 不同物候期苹果—大豆间作与大豆单作土壤含水量垂直分布

注:同一土层深度相同的小写字母表示差异不显著($p>0.05$)。

2.4 土壤水分对间作大豆生物量及产量的影响

距离苹果树行不同距离处大豆的生物量和产量(表 2)表明,苹果—大豆间作系统中,大豆的生长状况和产量受苹果树的影响与树行距离有关。处理 $T_{0.5}$, $T_{1.5}$ 的株高、地上生物量和产量与 CK 有着显著差异,处理 $T_{0.5}$ 的百叶干重与 CK 相比差异显著。将大豆产量与 3 个物候期 0—100 cm 深度的土壤平均含水量进行相关性分析,相关系数表现为:大豆开花期(0.801) > 苗期(0.689) > 结荚期(0.645),间作系统中大豆产量与 3 个物候期的土壤含水量均在 $p < 0.01$ 水平上显著相关。说明各物候期土壤含水量对于大豆植株的生长发育都有着重要作用,并最终影响了大豆产量和经济收益,在大豆开花期,土壤水分的供给状况对大豆产量的影响相对于其他物候期显得更为重要。

表 2 不同处理大豆生物量及产量

处理	株高/cm	百叶干重/g	地上生物量/g	产量/(t·hm ⁻²)
$T_{0.5}$	42.15±0.67a	13.55±0.44a	53.93±1.31a	1.48±0.02a
$T_{1.5}$	46.50±0.88b	14.42±0.22ab	64.77±1.36b	1.55±0.02b
$T_{2.5}$	50.92±0.93c	15.08±0.18b	80.23±0.91c	1.85±0.01c
CK	53.35±0.76c	15.28±0.33b	83.19±0.86c	1.91±0.02c

注:同列相同小写字母表示差异不显著($p > 0.05$)。

3 结论

(1) 播种前苹果—大豆间作系统土壤各层水分变异不大,在 0—100 cm 土层深度上与大豆单作相比没有显著差异。

(2) 不同物候期,苹果—大豆间作系统土壤含水量水平分布规律相似。间作地土壤含水量与苹果树行距离正相关,在整体上低于大豆单作地。不同物候期,苹果树与大豆主要水分竞争的水平分布区域面积大小不同,表现为:开花期 > 苗期 > 结荚期。

(3) 不同物候期,苹果—大豆间作系统土壤含水量垂直分布规律不同。在大豆苗期和结荚期,间作系统和大豆单作中土壤含水量均随着土壤深度的增加而增加,在开花期,土壤含水量出现先减小,然后增加的趋势。不同物候期,水分竞争的土层深度也明显不同,大豆苗期发生在 0—40 cm 土层,开花期为 0—100 cm 土层,结荚期为 0—60 cm 土层。这与该地区降水规律和苹果—大豆的根系分布及其他因素有关。

(4) 苹果—大豆间作系统的水分效应,整体表现为负效应,效应大小与物候期有关。苹果树和大豆由于水分因子场的重叠导致的对土壤水分的竞争在当

前树龄和管理措施下表现的较为明显。通过对土壤含水量和大豆生物量及产量的相关性分析可以发现,在该地区土壤水分对间作系统中大豆植株生长及最终产量的形成有着重要影响。

(5) 建议在苹果—大豆间作系统经营中,根据种间水分的竞争规律,采取适当的管理措施。大豆种植时,适当增加大豆和苹果树的复合距离,缓解近树区土壤水分的竞争。在大豆苗期进行秸秆覆盖,可在一定程度上减弱农田表层土壤蒸散,起到保墒的作用。在土壤水分竞争最为激烈的大豆开花期,对表层土壤松土,以除去结皮,促进降水入渗,并采取集雨补灌技术,以减少该时期土壤水分的种间竞争。加强田间管理措施,可以更好地发挥果农间作优势,充分提高当地的生态、经济及社会效益,调动农民积极性。

(6) 本研究按照大豆物候期进行试验设计,定量分析苹果—大豆间作系统中土壤含水量的分布特征及其对大豆产量造成的影响,是对研究区农林复合系统的相关研究的进一步补充和完善。但是间作系统中作物的生长状况及产量并不是土壤水分单一影响的结果,还与其他因子(光照、温度和土壤养分等)有关。因此果农间作系统种间关系下一步研究的重点应将各种要素进行有机的结合,并通过长期的定位观测,得到更加科学合理的结论,为发展农林复合这一有效的、可持续的土地利用方式提供支撑,进一步深入和完善农林复合系统理论及其可持续经营技术研究。

[参 考 文 献]

- [1] 毕华兴,云雷,朱清科,等. 晋西黄土区农林复合系统种间关系研究[M]. 北京:科学出版社,2011:20-25.
- [2] Gao Lubo, Xu Huasen, Bi Huaxing, et al. Intercropping competition between apple trees and crops in agroforestry systems on the Loess Plateau of China[J]. PloS-one, 2013, 8(7): e70739.
- [3] Yun Lei, Bi Huaxing, Gao Lubo, et al. Soil moisture and soil nutrient content in walnut-crop intercropping systems in the Loess Plateau of China[J]. Arid Land Research and Management, 2012, 26(4): 285-296.
- [4] Xu Huasen, Bi Huaxing, Gao Lubo, et al. Distribution and morphological variation of fine root in a Walnut-Soybean intercropping system in the Loess Plateau of China[J]. International Journal of Agriculture and Biology (Pakistan), 2013, 15(5): 998-1002.
- [5] 许华森,毕华兴,高路博,等. 晋西黄土区果农间作系统根系生态位特征[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24): 69-73.

(下转第 337 页)

为人均 GDP、常住人口增长率、万元 GDP 用水量 and 城市人均日生活用水量,人均水资源量和污水处理率亦具有一定影响作用。进而,通过情景分析,考察了人均 GDP、万元 GDP 用水量、人均日生活用水量和污水处理率 4 个敏感性指标的发展水平对南京城市水资源承载力的影响情况。在此基础上指出,提高生产、生活用水效率,节约宝贵水资源,辅以污水处理率的稳步提升,是丰水型城市稳定和提升水资源承载力的主要途径,并根据不同城市类型提出了相应的水资源承载力提升建议。

[参 考 文 献]

- [1] 许有鹏. 城市水资源与水环境[M]. 贵州 贵阳:贵州人民出版社,2003.
- [2] 夏军,张永勇,王中根,等. 城市化地区水资源承载力研究[J]. 水利学报,2006,37(12):1482-1488.
- [3] 左其亭. 城市水资源承载能力:理论·方法·应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [4] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.
- [5] 施雅风,曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [6] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报,1998,13(1):58.
- [7] 阮本青,沈晋. 区域水资源适度承载能力计算模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(3):57-61.
- [8] 孙鸿烈. 中国资源科学百科全书[M]. 北京:中国大百科全书出版社,2000.
- [9] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究:以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报,1993,8(3):229-237.
- [10] 惠泱河,蒋晓辉,黄强,等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2001,21(1):30-34.
- [11] 滕朝霞,陈丽华,肖洋. 城市水资源承载力多目标模型及其在济南市的应用[J]. 中国水土保持科学,2008,6(3):76-80.
- [12] 韩俊丽,段文阁,李百岁. 基于 SD 模型的干旱区城市水资源承载力模拟与预测:以包头市为例[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(4):188-191.
- [13] 赵军凯,李九发,戴志军,等. 基于熵模型的城市水资源承载力研究:以开封市为例[J]. 自然资源学报,2009,24(11):1944-1951.
- [14] 林占东,郑侃,刘正坤. 城市水资源承载力综合评价的 DEPPIM[J]. 中国农村水利水电,2008(12):59-62.
- [15] Bao Chao, Fang Chuanglin. Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: A case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China[J]. Ecological Economics, 2000, 62(3/4):508-517.
- [16] Rijsberman M A, Van de Ven F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(3):333-345.
- [17] 朱茵,孟志勇. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报,1999,23(5):119-122.
- [18] 赵建华,高风彦. 技术经济学[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [9] 云雷,毕华兴,任怡,等. 晋西黄土区核桃花生复合土壤水分效应研究[J]. 水土保持通报,2009,29(5):61-64.
- [10] 田阳,周玉喜,云雷,等. 晋西黄土区苹果—农作物间作土壤水分研究[J]. 水土保持研究,2013,20(2):29-32.
- [11] 马雯静. 晋西黄土区农林复合系统植物根系分布研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
- [12] 彭晓邦,仲崇高,沈平,等. 玉米大豆对农林复合系统小气候的光合响应[J]. 生态学报,2010,30(3):710-716.
- [13] 纳磊. 晋西黄土区嵌套流域场降雨径流过程及其模拟研究[D]. 北京:北京林业大学水土保持学院,2008.
- [14] 王德利. 生态场理论:物理生态学的生长点[J]. 生态学杂志,1991,10(6):39-43.

(上接第 331 页)

- [6] Dai Xiaoqin, Li Peng, Guo Xingqiang, et al. Nitrogen and phosphorus uptake and yield of wheat and maize intercropped with poplar [J]. Arid Land Research and Management, 2008, 22(4): 296-309.
- [7] 程鹏,曹福亮,汪贵斌. 农林复合经营的研究进展[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2010,34(3):151-156.
- [8] Friday J B, Fownes J H. Competition for light between hedgerows and maize in an alley cropping system in Hawaii, USA [J]. Agroforestry Systems, 2002, 55(2): 125-137.