

# 低丘红壤区农林间作系统水分利用竞争性评价<sup>①</sup>

赵英<sup>1,2</sup>, 张斌<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;

3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 农林复合系统由于其复杂的物种配置、下垫面差异及土壤水力学性质的空间变异, 可能影响土壤水分运动及水量平衡, 并决定物种间水分竞争性。本文研究了南方低丘红壤区花生南酸枣农林复合系统中土壤水分的时空动态、土壤水流通量和方向的二维变化; 结合土壤水量平衡, 评价了农林复合系统组分间的土壤水分竞争关系。研究结果表明: 农林复合系统能够利用 50~100 cm 土层土壤水分, 对干旱有一定缓冲作用; 但在季节性干旱土壤水分期向树干运动, 说明南酸枣与花生间作系统也存在着水分竞争, 竞争同树龄和空间距离有关。花生的种植减小了地表径流却加剧了土壤的流失。农林复合系统改变了土壤水量平衡, 复合后系统蒸散量提高 5%~12%, 而净渗漏量及土壤水分贮存量减小。农林复合系统减小了 30~100 cm 土壤水分运动通量, 引起土壤水分运动方向变化, 影响了作物水分利用体系, 需在设计优化管理水资源的农林复合模式时充分考虑这些因素。

**关键词:** 农林间作系统; 水分竞争性; 水量平衡模型; 水流通量和方向

**中图分类号:** S161.2

从近 50 年来气象资料平均统计来看, 我国南方红壤丘陵区虽然雨热资源丰富, 但是由于雨热不完全同季、降雨超前于蒸发 2.62 个月, 往往导致作物生长期降雨偏少; 加之红壤自身的调蓄供水能力弱, 土壤、气候和作物的共同作用往往导致季节性干旱这一区域性水问题。因此, 如何通过水土资源的调控, 缓解季节性干旱在该区显得尤为重要。农林复合系统被认为能够充分利用不同深度层次的土壤水分, 提高水分利用效率, 而作为亚热带地区应对季节性干旱的有效利用方式<sup>[1]</sup>。然而, 农林复合后植物组分之间也可能存在着水分竞争, 影响了这一土地利用方式的推广和实施。这主要是由于其复杂的作物配置、下垫面差异及土壤水力学性质的空间变异所致。因此, 研究农林复合系统土壤水分运动及水量平衡, 在调控水土资源方面具有一定的理论和现实意义。

农林复合模式水分利用问题, 国内外已开展了大量的研究<sup>[2-6]</sup>, 但缺乏林木与作物对土壤水分共同作用机理连续、系统、定量的研究<sup>[7-8]</sup>。目前, 有关土壤水分的研究, 特别是运用土壤-植物-大气连续体 (简称 SPAC) 水分传输理论模拟土壤水分时空动态变化, 进一步定量地研究农田生态系统中作物水分利用关系等

方面, 都已有了很大的突破和深化<sup>[9-10]</sup>。但在将模型用于复合系统分析水分竞争方面, 研究尚相对欠缺<sup>[11-12]</sup>。农林复合生态系统中由于两种以上的植物根系交错分布, 状况要复杂得多, 使得土壤水分运动为二维或三维运动, 这方面的研究还处在试验阶段, 没有完整、系统的理论<sup>[8]</sup>。本文利用南酸枣与花生复合种间水分竞争定位试验, 通过探讨农林复合系统土壤水分时空变化, 分析土壤水流通量二维运动大小和方向, 结合农林复合模式土壤水量平衡模型量化与评估农林复合系统土壤水分利用关系, 为建立合理的农林复合管理技术, 减少土壤水分竞争, 提高土壤水利用效率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验布置于中国科学院红壤生态实验站水土保持试验区 (28°15'N, 116°55'E), 地处江西省余江县, 属亚热带湿润气候。年均气温 17.6℃, ≥10℃ 积温为 5 527.6℃, 年均降水量 1 794 mm, 但季节分布不均, 雨季 (3—6 月) 约占全年降水的 50%。试验地为低丘岗地地形, 海拔 38~45 m, 坡度 5°~8°, 土壤为第四

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (49701008), 国际科学基金会 (IFS) 项目 (D/2872-1) 和国际原子能机构 (IAEA) 项目 (D1-CPR-10407) 资助。

作者简介: 赵英 (1979—), 男, 甘肃西和人, 博士, 副教授, 主要从事土壤物理和农业生态研究。E-mail: yzhaosoils@gmail.com

纪红黏土发育的典型红壤，中国土壤系统分类定为普通黏化湿润富铁土。田间土壤剖面主要理化性质见表 1，可见土壤质地类型为黏土，土壤剖面半棱角状结构

发育良好，土壤 pH 值为 4.5 左右，介于  $pF = 1.0$  至  $pF = 4.2$  之间的土壤有效水含量为 18% (0 ~ 30 cm)，在土壤下层仅为 10%。

表 1 试验区土壤剖面主要理化性质

Table 1 Soil basic physical and chemical characteristics in investigated profile of the research area

深度 (cm)	砂粒 (g/kg)	粉粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)	体积质量 (g/cm <sup>3</sup> )	pH	有机碳 (g/kg)	阳离子交换量 (cmol/kg)	饱和导水率 (cm/d)	土壤含水量(%) pF=1.0	土壤含水量(%) pF=4.2
0~7	190	430	380	-	4.3	4.2	6.2	26.3	-	-
7~22	170	430	400	1.35	4.4	2.4	6.2	22.0	41	23
22~45	140	400	460	-	4.5	1.5	7.6	12.3	-	-
45~95	120	360	520	1.2	4.5	1.2	9.2	9.3	44	26
95~150	110	360	530	1.27	4.5	1.1	9.9	7.0	44	29
150~200	100	360	540	1.46	4.5	2.5	15.8	6.5	44	34

试验前土地利用方式为马尾松 (*Pinus massoniana* L.) 疏林草地，1999 年初建成试验小区。试区总面积 4 500 m<sup>2</sup> (坡长 75 m × 宽 60 m)，顺坡等高布局 3 个区组 (3 次重复)，组间距 6 m；每区组设 5 个小区，区间距亦为 6 m。小区面积为 120 m<sup>2</sup> (长 20 m × 宽 6 m)，小区用水泥板围成以防区内外径流交换，水泥板插入土中 50 cm，露出地表 30 cm。5 个小区试验处理分别为花生单作 (简称 P，下同)、南酸枣小树单作 (T1) 和南酸枣大树单作 (T2)、南酸枣小树花生间作 (T1P) 和南酸枣大树花生间作 (T2P)。移栽时分别采用 9 龄南酸枣树 (大树) 和 4 龄南酸枣树 (小树)，整枝后当年 3 月移入。南酸枣树单作和复合处理每个小区种植 3 行南酸枣，每行 3 颗，行距 6 m，株距 2 m，上下坡边预留 1 m。4 月上旬种植花生，花生单作小区种植 40 行花生，每行 36 穴，每穴种植 2 株，行距 50 cm，株距 50 cm；间种处理中花生距树行 75 cm 处开始种植，种植密度同花生单作处理。田间试验布置按随机区组排列。

### 1.2 地表径流测定

每一小区下端挖坑砌池 (长 × 宽 × 高 = 1.5 m × 1.0 m × 0.5 m)，安装翻斗径流仪，用 RS260-375 磁感应计数器 (magnetic actuated counter) 自动记录翻动次数，对翻斗体积标定后计算径流量，并将收集的径流液过滤计算土壤侵蚀量<sup>[13]</sup>。

### 1.3 土壤水分测定

每个小区沿坡向分别安装张力计和中子测水铝质导管。其中大树 4 套，小树和单作花生区 3 套，安装位置为三行树的中间行正中一颗树侧面 50 cm 起始，

水平距离树行带 0、1、2 与 4 m (仅为大树区) 处，花生单作处理为复合处理的空间对应位置 (即由于每个小区长、宽度完全一致，花生单作处理中监测剖面距水泥板四周的距离与复合处理相同)<sup>[14]</sup>。每根中子管长 2 m，采用江苏省农业科学院原子能研究所生产的 LNW-50C 型中子仪，测量时间为 5 天一次，数据采集深度为 20 ~ 100 cm 土层内每隔 10 cm，100 ~ 200 cm 内间隔 20 cm 测定，表层土壤 (<20 cm) 含水量用烘干法测定。张力计组距中子仪水平距离 10 cm，测量深度分别 10、30、100、150 和 180 cm，测量时间为每两天早晨 8:00—8:30。

### 1.4 土壤水流通量计算

根据达西定律计算坡向和重力方向的水流通量：

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (1)$$

式中， $q$  为水流通量 (mm/d)，正方向向下， $k(\theta)$  为基于土壤水分含量的非饱和导水率， $\Psi$  为土壤水势， $z$  为土壤深度。 $k(\theta)$  通过瞬时剖面法确定，其表达式为<sup>[9,15]</sup>：

$$k(\theta) = a \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^b \quad (2)$$

式中， $\theta$  为土壤含水率， $\theta_s$  为饱和导水率， $a$ 、 $b$  为同土壤质地有关的经验系数。

土壤水流通量计算时，考虑了坡地水分在坡面的二维运动。总水流通量根据坡向和重力方向通量几何关系计算<sup>[16]</sup> (图 1)：

$$q_r = \sqrt{(q_d + q_v \sin \alpha)^2 + (q_v \cos \alpha)^2} \quad (3)$$

$$\gamma = \cos^{-1}(q_v \cos \alpha / q_r) - \alpha \quad (4)$$

式中,  $q_r$  为总水流量;  $q_d$ 、 $q_v$  分别为坡向和重力方向

的水流量, 以沿坡向和重力方向为正;  $\gamma$  为水流量方向 (理论取值范围  $0 \sim 360^\circ$ );  $\alpha$  为山坡坡度 (本例中为  $5^\circ$ )。

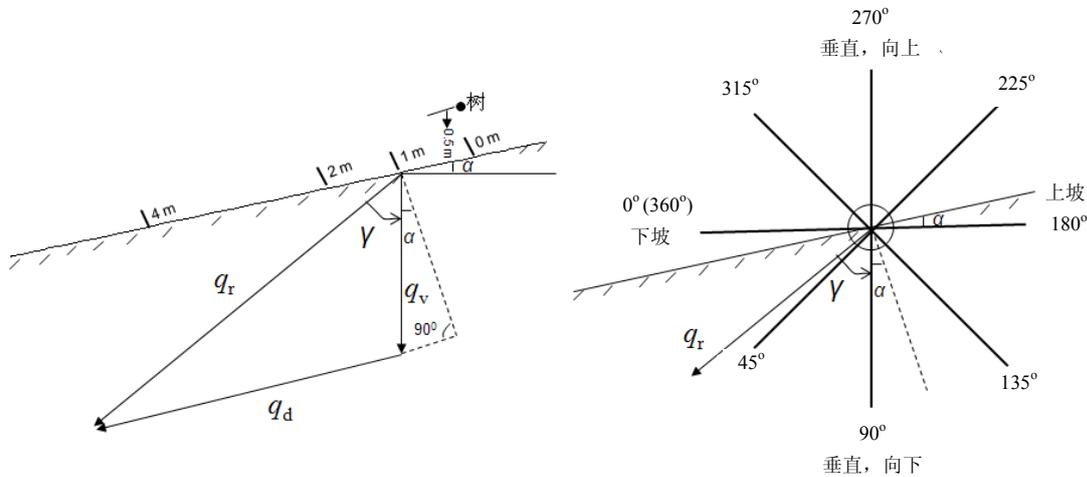


图 1 土壤水流量 (左边) 和方向 (右边) 示意图

Fig. 1 Sketch of vertical, downslope, and resultant water fluxes (left) and direction of resultant water fluxes (right)

如图 1 所示, 当  $\gamma$  取  $0 \sim 180^\circ$  之间的值时, 表示土壤水分向下入渗; 若为  $180^\circ \sim 360^\circ$  之间的值时, 表示土壤水分向上蒸发; 当  $\gamma$  取  $0 \sim 45^\circ$  间的值, 表示土壤水分沿坡向向下运动; 而取值范围在  $180^\circ \sim 225^\circ$  时, 土壤水分运动则朝向树行方向。因此, 可利用水流运动方向角判定水分运动的方向, 进而确定物种间由于根系交互作用所形成的水分竞争关系。本文利用普通克立格法通过 Surfer 软件绘制等值线图, 从而实现水分运动方向二维显示。

### 1.5 系统蒸散量估算

建立土壤水量平衡模型<sup>[11]</sup>, 估算系统蒸散量:

$$ET = P - R - \Delta S - CI - R_s - D \quad (5)$$

式中,  $ET$  为蒸散量, 即土壤蒸发量和植被蒸腾量之和;  $P$  为降水量, 为本试验区气象站监测数据;  $R$  为监测的地表径流量;  $\Delta S$  为  $0 \sim 200$  cm 土体水分贮存变化量, 根据中子水分仪监测结果计算;  $CI$  为植被冠层截留量, 由本区多年观测及统计模式得出<sup>[17]</sup>;  $R_s$  为土壤水分水平流;  $D$  为净渗漏量, 即渗漏量同地下水补给量的差值, 由下式给出:

$$D = q \Delta t = -k(\theta) \frac{\partial w}{\partial z} \Delta t \quad (6)$$

式中,  $\Delta t$  为时间段。  $R_s$  的计算同公式 (6), 即  $D$  为  $R_s$ ,  $z$  为  $x$  (土壤水平距离), 水平方向的  $k(\theta)$  被近似为同垂直方向的相等。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分时空变化

1999—2002 年的监测结果表明, 土壤水分含量季节性变化可分为 3 个阶段 (图 2): 3—6 月雨季阶段, 几乎集中了全年降雨量的 50%, 各层土壤水分含量高,  $0 \sim 30$  cm 土层含水量在  $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 且变化和缓 ( $CV = 5.2\%$ ); 7—10 月旱季阶段, 高温少雨,  $0 \sim 30$  cm 土层含水量均小于  $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 100 cm 以上土层间土壤水分含量变化波幅很大 ( $CV = 8.6\%$ ), 100 cm 以下土层土壤含水量常年大于  $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ; 11 月—翌年 2 月低温阶段, 各层土壤水分含量变化介于上述两者之间。土壤水分含量变化最剧烈时期在 6 月中下旬, 即旱季伊始而花生开花结荚阶段 (花针期); 在旱季中期, 30 cm 土层土壤水分含量在 7 月上旬 (结荚期) 达到了最低值  $0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 接近于凋萎土壤水分含量。4—6 月表层土壤水分含量均在 30% 左右, 不会对花生生长造成严重影响; 而 7—8 月表层土壤水分含量较低, 将直接影响花生生长。但此时间作与花生单作并没有明显区别, 说明花生区表层土壤水分状况的降低非由树木的引入直接影响。红壤的通透库容较高, 决定了其具有较高的透水性, 即使在旱季以后, 土壤深层尚贮存不少有效水, 这为农林间作的水分协同利用提供了可能<sup>[13]</sup>。如果选择深根系树木或根系生态相似性较小的物种复合, 则使这种可能具有较大的可行性。

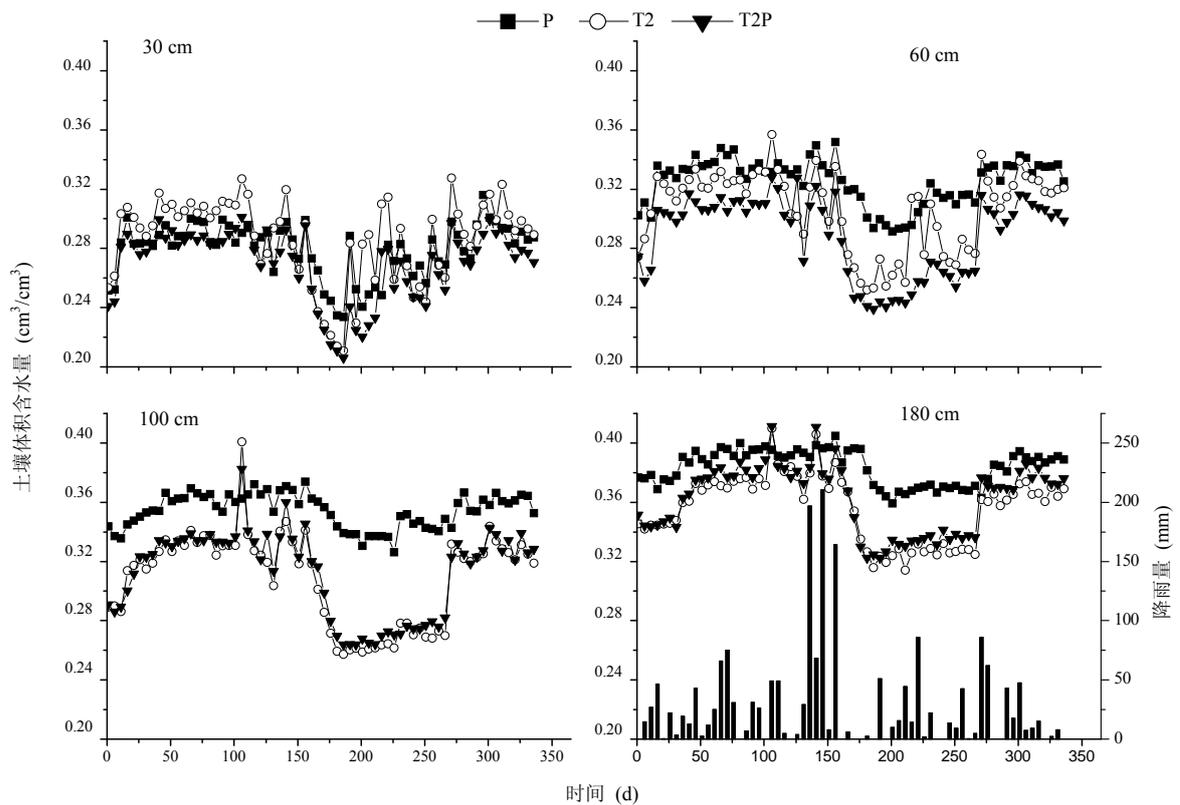


图 2 2000 年 P、T2 和 T2P 处理离树 1 m 处土壤水分含量时空变化(横坐标时间计算以 1 月 1 日为起始时间,下同)

Fig. 2 Variation of soil water contents at 1 m distance from trees in P, T2 and T2P treatments in 2000

随离树距离的不同,土壤水分存在空间变异。图 3 表明不同处理距树行不同位置土壤贮水量变化。在 T2P 处理中,年均土壤贮水量在离树 0、1、2、4 m 处分别为 622.2、641.0、629.3 和 646.1 mm,说明不同位置由于作物覆盖及根系差异对水分分配和利用的综合影响,对土壤贮水量空间变异影响很大。这种变异也因处理而异,P、T1、T2、T1P、T2P 处理离树 1 m 位置 0~200 cm 土层土壤储水量分别为 619.0、654.7、600.0、622.8 和 623.9 mm。可见不同土地利用方式对于土壤内水分的利用程度是不同的,以小树单作系统最低,大树复合最高,表明复合系统由于其紧密的根系加剧了对土壤水分的利用,影响了土壤水分贮存关系。处理间土壤剖面含水率比较表明:与花生单作处理相比,树木单作和复合处理中相应位置 30、60 cm 土层土壤含水量差异较小,60 cm 以下土层差异较大(图 2)。这说明花生根浅,仅利用表层土壤水分,复合农林系统可利用深层土壤水分,可能与花生表层水分竞争较小,这与南酸枣树的根系状况相一致<sup>[18]</sup>。

## 2.2 土壤水流方向变化

图 4 表明了离树 1 m 处土壤水分二维运动方向。P 处理中,在雨季,随着降雨入渗,土壤水流整体向下

流动,特别是深层 50~200 cm 水流方向角为  $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ,水沿坡面向下流动,侧向水流明显发生;而在旱季水流方向角为  $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ ,土壤水由深层向上运动。T1 处理中,旱季水流方向角由表层向下从  $180^{\circ}$  向  $90^{\circ}$  过渡,表明土壤水由向树行方向逐渐转为向下运动。比较而言,T2 处理旱季土壤水流方向角为  $135^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ,整个剖面土壤水主要朝向树行方向,说明大树对深层土壤水分具有更强的吸附力。T1P 处理中,表层水流方向角为  $45^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ,水向下运动,且全年变化不是很大;而深层水流方向角为  $45^{\circ} \sim 315^{\circ}$ ,年内变化较大,特别是在季节性干旱期,有较深层次的土壤水分向上运动。T2P 处理中,土壤全层年际间水流方向变化都很大,说明大树加剧了土壤水分的运动。值得一提的是,同树单作系统相比,花生单作和复合系统中水流方向剖面图特征比较相似,特别是在旱季土壤水分均由深层向上水流方向角呈向外发散状递减,这主要是由于离树 1 m 处主要为花生生长区。比较而言,花生复合系统比单作系统深层方向角更大( $>270^{\circ}$ ),土壤水向上流动,充分表明旱季深层根系通过“根系提水”作用形成的水分传递对表层土壤水分补给,将可能对花生的生长产生一定的积极作用。当然,季节性干旱

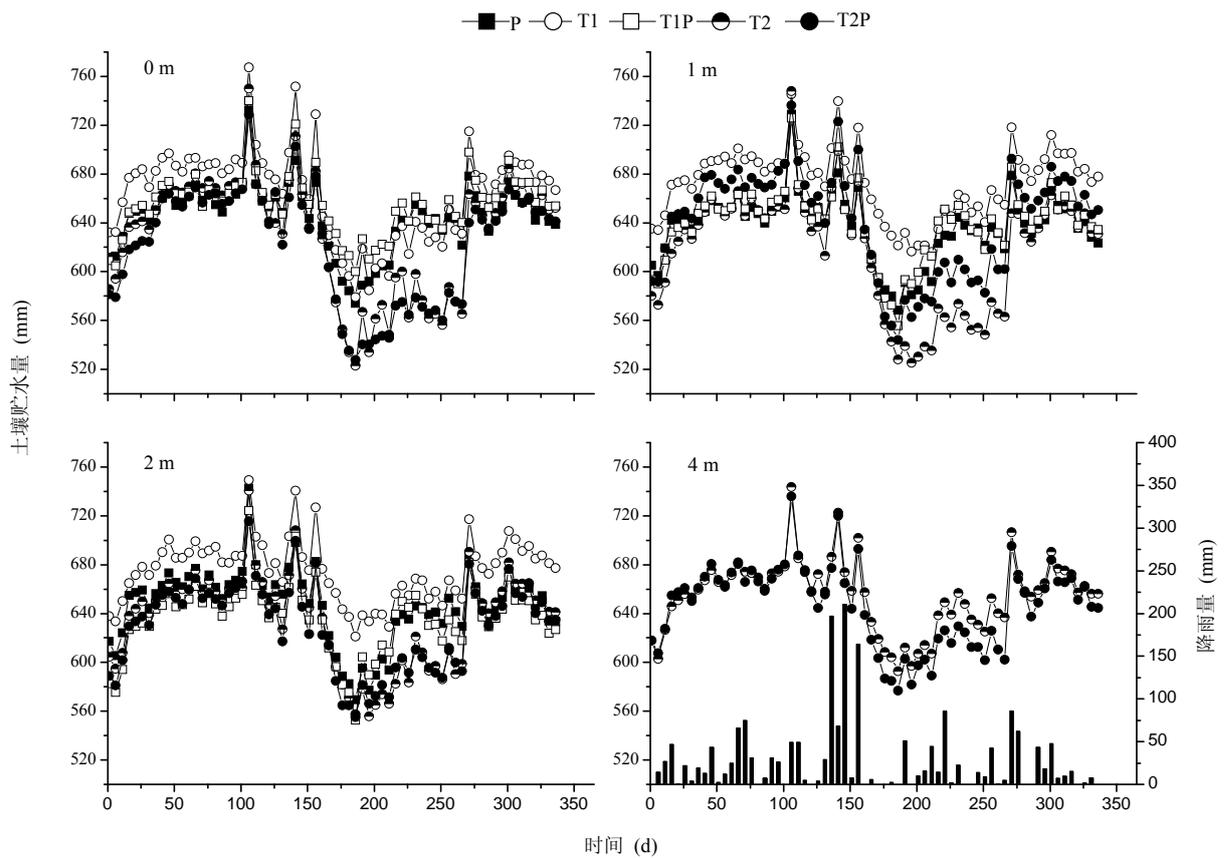


图3 2000年不同处理土壤贮水量在离树0, 1, 2, 4 m处的变化

Fig. 3 Variation of soil water storages at 0, 1, 2, and 4 m distances from tree rows in T2P treatment in 2000

期土壤水分以向上朝树行运动为主，而在非季节性干旱期主要是沿坡面向下运动，这也在一定程度上说明作物和树之间潜在的水分竞争关系，主要是由于树木根系表面侧向分布的影响。深根性林木根系多集中分布于树冠范围内，故南酸枣与花生的水竞争主要集中在树冠两侧2~3行花生处。

### 2.3 土壤水流通量

图5为2000年4月1日至8月30日不同处理距树1 m位置30~100 cm土层水流通量的变化。结果表明，不同处理对30~100 cm土层水流通量的变化影响明显，不同利用方式由于其降雨分布、蒸散发及根系吸水能力的不同，土壤水分通量发生变化。复合系统减小了土壤水流通量，尤以大树复合系统更为显著，蒸散发能力更强。花生单作系统由于花生的耕作松土提高了水分入渗能力，且100 cm深处没有根系吸水，水流通量最大。小树单作系统林冠截留量小，降雨到达地面的量大，根系吸水也较小，故水分通量比大树单作系统大。降雨明显影响土壤水流通量的变化，在雨季土壤水流通量变化剧烈，而在旱季趋于稳定。

例如，在T2P处理中，6月4—5日天降大雨， $q_r$ 由-0.06 mm/d增大到9 mm/d， $\gamma$ 由299°减小到74°，表明由于降雨土壤水流方向从向上蒸发迅速转为入渗。在较长时间无降雨条件下，土壤水流通量很小，一般为 $1.0 \times 10^{-2}$ 数量级，如8月8日前长期无雨，该日土壤水流通量仅为-0.016 mm/d，水流方向角为288°，土壤水分向上运动。

### 2.4 土壤水分平衡分量的变化

表2表明2000—2002年不同处理离树不同距离土壤水量平衡变化。同树木单作系统比较，农林复合后系统蒸散量提高5%~12%，而净渗漏量及土壤水分贮存量减小。0~200 cm土体水分贮存变化量同降雨量关系密切，2000年降雨量为1928 mm，土壤水分贮存量为正值，为贮水过程。2001年降雨量为1614 mm，土壤水分贮存量为负值，为耗水过程。以降雨到达土壤垫面的雨量为100%计，降雨分配为：地表径流占10%~15%，植被冠层截留占5%~20%，地表入渗量占65%~85%。入渗到土壤中的水量有15%~20%通过渗漏输出，5%~10%转化为土壤贮水，70%~80%为蒸散量。

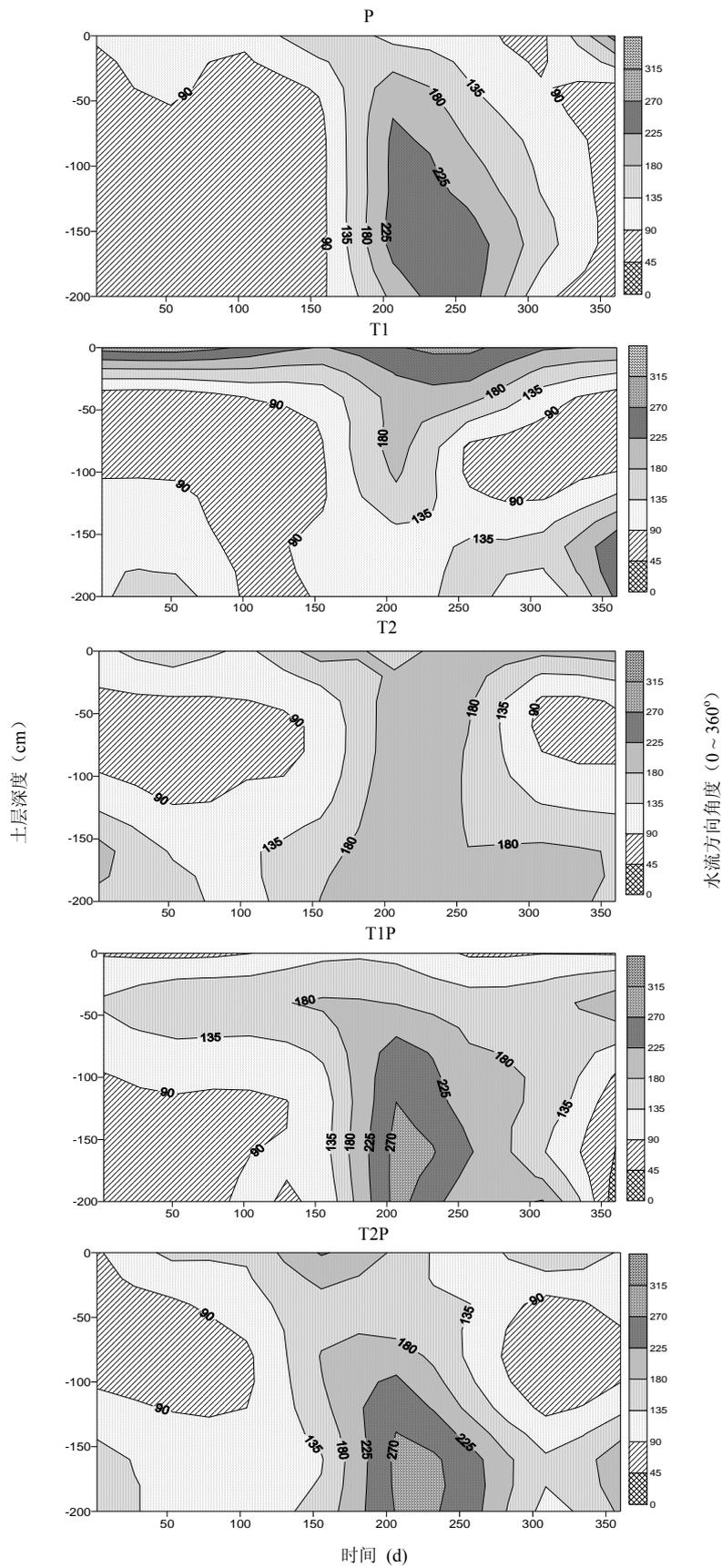


图 4 2000 年不同处理离树 1 m 处土壤水流方向 (0~360°) 克里格插值图

Fig. 4 Kriging maps for water flow directions at 1 m distance from tree rows in different treatments in 2000

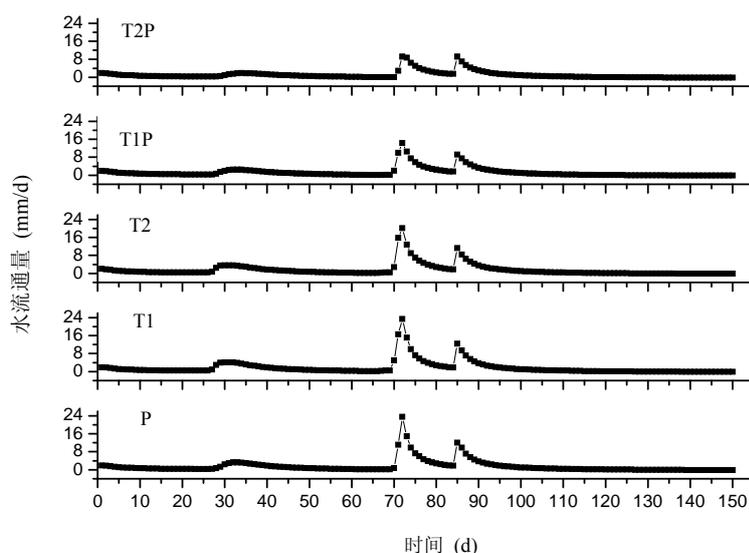


图5 2000年不同处理距树1 m处30~100 cm深土壤水流通量变化(横坐标时间计算以4月1日为起始时间)

Fig. 5 Soil vertical water fluxes at 30~100 cm depth at 1 m distance in different treatments in 2000

表2 2000—2002年不同处理离树0、1、2、4 m处土壤水量平衡

Table 2 Water balances at 0, 1, 2, and 4 m distances from tree rows under the different treatments during 2000-2002

处理	距离 (m)	2000年			2001年			2002年		
		蒸散量 (mm)	净渗漏量 (mm)	贮水量 (mm)	蒸散量 (mm)	净渗漏量 (mm)	贮水量 (mm)	蒸散量 (mm)	净渗漏量 (mm)	贮水量 (mm)
P	0	1 487.6	199.3	73.1	1 340.3	188.5	-40.9	1 271	184.2	41.7
	1	1 437.3	155.5	66.5	1 338.2	184.6	-35.6	1 253	178.0	56.2
	2	1 491.3	105.5	62.2	1 365.1	159.4	-37.7	1 327.3	128.4	39.8
T1	0	1 198.9	210.1	104.0	1 222.3	223.8	-62.3	1 164.4	187.6	77.0
	1	1 117.1	186.6	96.9	1 213.1	225.4	-58.2	1 090.0	188.8	61.4
	2	1 032.0	175.4	89.1	1 126.7	215.6	-54.6	1 103.8	170.4	60.3
T2	0	1 264.4	123.6	158.8	1 323.3	153.8	-97.3	1 171.8	113.0	91.0
	1	1 131.8	139.2	142.6	1 292.9	188.2	-89.4	1 151.1	120.7	76.6
	2	1 041.4	199.7	108	1 139.0	202.0	-75.1	1 106.8	186.7	66.4
	4	979.7	232.6	94.7	1 116.2	213.3	-67.9	1 092	203.3	55.9
T1P	0	1 247.5	142.7	94.3	1 213.5	207.7	-92.5	1 238.6	115.5	68.1
	1	1 264.7	129.7	87.6	1 295.9	188.4	-87.7	1 263.2	85.2	62.7
	2	1 168.9	94.1	83.5	1 242.8	155.6	-84.9	1 264.1	98.8	53.5
T2P	0	1 260.3	99.3	146.1	1 261.8	114.8	-127.3	1 153.0	100.3	85.3
	1	1 341.5	138.0	139.5	1 333.8	129.2	-119.1	1 232.2	124.0	75.2
	2	1 137.4	150.5	107.4	1 216.9	153.9	-106.4	1 206.7	141.0	58.6
	4	1 214.0	189.7	89.6	1 300.4	213.4	-106.8	1 219.9	172.7	54.3

200 cm 以下土层水分补给量为降雨量的 5%~10%。

树木单作系统中, 随离树距离的增大, 蒸散量减小。复合系统由于花生的覆盖, 随离树距离的增大, 蒸散量先增大后减小, 在离树 1 m 处最大, 说明离树 1 m 处根系活动剧烈, 加剧了土壤水分的利用。小树

系统随离树距离的增大, 土壤水净渗漏量减小, 而在大树系统中正好相反, 即随距离的增大而增大, 这主要是由于大树系统根系贮水及吸水较强, 减小了根区的渗漏量。利用空间变异评估复合处理和空间距离对水分利用的影响表明, 2000、2001 和 2002 三年中不

同处理间蒸散量有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 而不同离树距离蒸散量仅在 2000 年有显著性 ( $P < 0.05$ )。计算花生的作物需水量在 P、T1P 和 T2P 处理分别为 694、673 和 631 mm, 南酸枣的作物需水量在 T1、T2、T1P 和 T2P 处理中分别为 912、1012、1010 和 1021 mm, 这表明复合处理减小了花生需水量的同时却增大了南酸枣的需水量, 但均不显著。

## 2.5 水土流失效果

2000—2002 年地表径流和土壤侵蚀量监测结果表明, 下垫面差异对地表径流有显著的影响 (表 3)。树木单作系统 (T1 与 T2) 地表径流量最高, 径流系数达

4%~16%, 花生单作系统 (P) 径流系数为 1%~15%, 复合农林系统 (T1P 与 T2P) 径流系数为 0.7%~7.1%。与南酸枣单作系统相比, 农林复合系统地表径流减少 50%~60%; 但土壤侵蚀量却增加了 247%~352%。与花生单作系统相比, 农林复合系统地表径流量减少 6%~21%, 土壤侵蚀量减少 11%~23%。5 个处理中花生单作系统土壤侵蚀量最高, 可达 677.7 t/(km<sup>2</sup>·a), 超过了我国红壤丘陵区土壤容许流失量 (500 t/(km<sup>2</sup>·a))。可见土壤流失受耕作强度的影响很大, 花生的种植减弱了径流却加剧了土壤的流失, 且存在着一定的水土流失风险。

表 3 2000—2002 年不同处理地表径流和土壤侵蚀量

Table 3 Runoffs and soil loss under the different treatments during 2000-2002

处理	2000 年			2001 年			2002 年		
	径流量 (mm)	径流系数 (%)	侵蚀量 (t/(km <sup>2</sup> ·a))	径流量 (mm)	径流系数 (%)	侵蚀量 (t/(km <sup>2</sup> ·a))	径流量 (mm)	径流系数 (%)	侵蚀量 (t/(km <sup>2</sup> ·a))
P	146.9 ± 5.3	7.6	677.7 ± 22.1	19.9 ± 4.9	1.2	58.2 ± 14.8	66.6 ± 9.6	3.9	212.3 ± 34.5
T1	284.6 ± 23.0	14.8	148.7 ± 17.6	67.5 ± 22.2	4.2	29.7 ± 10.1	150.8 ± 54.8	8.9	66.8 ± 25.0
T2	303.6 ± 9.7	15.8	150.8 ± 14.4	83.3 ± 28.4	5.2	35.9 ± 12.8	145.1 ± 47.6	8.6	62.7 ± 21.8
T1P	116.7 ± 8.7	6.1	605.7 ± 70.6	11.1 ± 4.4	0.7	29.8 ± 12.3	25.9 ± 2.8	1.5	73.0 ± 8.1
T2P	137.4 ± 3.4	7.1	520.3 ± 14.7	21.8 ± 5.6	1.4	55.1 ± 15.1	28.6 ± 3.9	1.7	69.7 ± 9.9

注: 表中数值为 3 个重复平均值 ± 标准误差。

田间统计表明, >20 mm 的降雨可产生地表径流, >50 mm 的降雨才产生土壤侵蚀。地表径流主要发生在 4—9 月份, 次降雨事件径流系数可达 20%~30%。2000 年降雨量在 3 年中最大, 且暴雨频繁, 故地表径流和土壤流失量都很大。T1 与 T2 中地表径流量达 284.6~303.6 mm, 然后依次是 P、T1P 与 T2P 处理。没有耕作的南酸枣单作处理中土壤紧实, 降低了水分入渗, 增加了地表径流; 复合农林系统降低地表径流, 可能由于树行中枯枝落叶增加了地表粗糙度。同农作物单作比较, 复合有利于水土保持。

## 3 结语

本文利用水量平衡法, 量化了农林复合系统水分利用, 这为更清晰地认识和优化农林复合系统提供了基础。土壤水分运动及土壤水量平衡因农林复合模式及空间位置而异。复合促进了花生根区水分的吸收, 提高了系统蒸散量。土壤水分时空变化及土壤水分在剖面的运动表明, 复合系统能够利用土壤 50~100 cm 土层的水分。在季节性干旱期, 南酸枣蒸腾较为剧烈, 表层土壤水分有效性受到限制, 南酸枣同花生之间存

在着一定的水分竞争, 但随距离的变化不是很大。为了充分利用土壤不同层次上的水资源, 就必须因地制宜选择根系分布较深、旺盛生长期与农作物生长期重叠较小或不重叠的树种。并在栽培过程中注意时空配置, 扬长避短。

坡地雨水利用是农业水管理的核心, 其实质就是如何强化雨水资源化过程。坡地不同利用方式所构建的垫面系统, 在雨水的分配、雨水的土壤侵蚀、土壤库雨水的持蓄、土壤水分运动通量大小和方向等方面均存在一定差异。因此, 在进行区域水资源管理的农林复合系统构建设计时, 应充分考虑上述影响因子。

## 参考文献:

- [1] 张斌, 张桃林. 低丘红壤区农林间作系统的水分生态特征及生产力. 生态学杂志, 1997, 16(4): 1-5
- [2] Sanchez PA. Science in agroforestry. Agroforestry Systems, 1995, 30: 5-55
- [3] Lefroy EC, Stirzaker R J. Agroforestry for water management in the cropping zone of southern Australia. Agroforestry Systems, 1999, 45(1): 277-302

- [4] Kho RM. A general tree-environment-crop interaction equation for predictive understanding of agroforestry systems. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 2000, 80: 87-100
- [5] 赵兴征, 卢剑波. 农林系统研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(2): 127-132
- [6] Puri S, Nair PKR. Agroforestry research for development in India: 25 years of experiences of a national program. *Agroforestry Systems*, 2004, 61: 437-452
- [7] 张劲松, 孟平, 宋兆民, 陆光明, 马秀玲. 农林复合模式耗水特征的数值模拟—模型的建立与检验. *林业科学研究*, 1996, 9(4): 331-337
- [8] 朱首军, 丁艳芳, 薛泰谦. 土壤-植物-大气 (SPAC) 系统和农林复合系统水分运动研究综述. *水土保持研究*, 2002, 7(1): 49-53
- [9] 康绍忠, 刘晓明, 高新科, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输的计算机模拟. *水利学报*, 1992(3): 1-12
- [10] Soares JV, Almeida AC. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, 2001, 253: 130-147
- [11] Palomo MJ, Moreno F, Fernandez JE, Diaz-Espejo A, Giron IF. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agricultural Water Management*, 2002, 55: 15-35
- [12] Onyewotu LOZ, Ogirigi MA, Stigter CJ. A study of competitive effects between a Eucalyptus camaldulensis shelterbelt and an adjacent millet (*Pennisetum typhoides*) crop. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 1994, 51: 28-86
- [13] Khan AAH, Ong CK. Design and calibration of tipping bucket system for field runoff and sediment quantification. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1997, 52: 437-443
- [14] 王兴祥, 何园球, 张桃林, 张斌, 王明珠. 低丘红壤花生南酸枣间作系统研究 III. 土壤水分. *土壤*, 2003, 35(3): 232-235
- [15] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [16] Harr RD. Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *Journal of Hydrology*, 1977, 33: 37-58
- [17] 仪垂祥, 刘开瑜, 周涛. 植被截留降水量公式的建立. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(2): 47-49
- [18] 赵英, 张斌, 王明珠. 农林复合系统水肥光竞争机理与评价. *生态学报*, 2006, 26(6): 1 792-1 801

## Competitive Assessment of Water Use in Alley Cropping System in Low Hilly Red Soil Region

ZHAO Ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Bin<sup>1,3</sup>

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 College of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Alley cropping system may influence water movement and balance owing to its complex interactions between crop and tree rooting systems as well as spatial variation of landscapes and characteristic of soil hydraulics. The objective of this study is to analyze the temporal and spatial variations of soil water regime, to quantify two dimensional water fluxes and directions and to evaluate water use in one alley cropping system, consisting of *Choerospondias axillaris* and peanut (*Arachis hypogaea*) in subtropical China. A multi-layered water balance model, with water movement between layers along soil water potential was applied. The test period was from March 1999 to December 2002 in fifteen experimental plots. The result showed *Choerospondias axillaris* could utilize soil water in deep soil (50-100 cm depth) and alleviate the seasonal drought. The direction of soil water movement indicated that soil water moved to hedgerow of *Choerospondias axillaris*, which indicated that *Choerospondias axillaris* also competed with peanut for water in the tested alley cropping systems especially in seasonal drought. Water competition was related to the tree spacing and tree age. The alley cropping system increased 5%-12% of evapotranspiration, decreased net drainage and water storage, and decreased 50%-60% of runoff after cultivation of peanut. The alley cropping system can change soil water balance and water use patterns, which is needed to be considered in the ecological construction.

**Key words:** The alley cropping system, Competitiveness for water, Water balance model, Water flux and direction