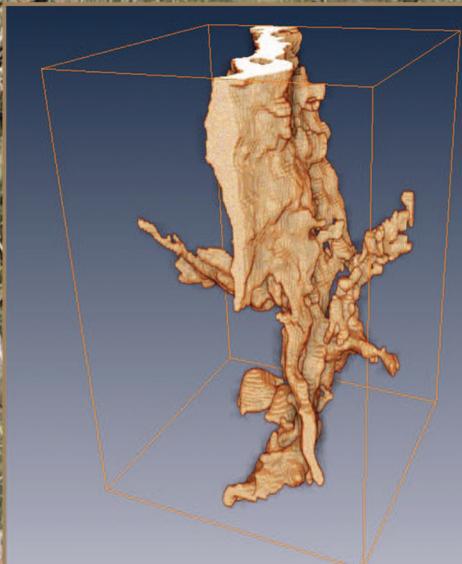


ISSN 0564-3929

# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



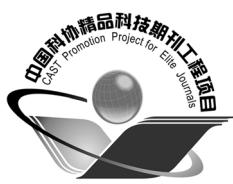
中国土壤学会  
科学出版社

主办  
出版

2015

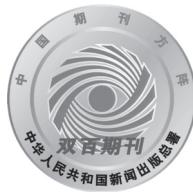
第 52 卷 第 3 期

Vol.52 No.3



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

## 目 次

### 综述与评论

- 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究 ..... 蔡祖聪 张金波 黄新琦等 (469)  
土壤裂隙及其优先流研究进展 ..... 张中彬 彭新华 (477)

### 研究论文

- 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征 ..... 温磊磊 郑粉莉 沈海鸥等 (489)  
青藏高原永冻土活动层厚度预测指标集的建立及制图 ..... 陈吉科 赵玉国 赵林等 (499)  
贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化 ..... 杨子江 那海健 周俊等 (507)  
成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究 ..... 廖丹 于东升 赵永存等 (517)  
河北省土壤温度与干湿状况的时空变化特征 ..... 曹祥会 雷秋良 龙怀玉等 (528)  
喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征 ..... 付同刚 陈洪松 王克林 (538)  
大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究 ..... 杨玉峥 林青 王松禄等 (547)  
化学转化法测定水体中硝酸盐的氮氧同位素比值 ..... 王曦 曹亚澄 韩勇等 (558)  
<sup>13</sup>C脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响 ..... 刘萍 江春玉 李忠佩 (567)  
垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响 ..... 慈恩 王莲阁 丁长欢等 (576)  
施入<sup>15</sup>N标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用 ..... 赵伟 梁斌 周建斌 (587)  
长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响 ..... 鲁艳红 廖育林 周兴等 (597)  
长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响 ..... 冀建华 侯红乾 刘益仁等 (607)  
高粱分泌硝化抑制物对羟基苯丙酸与质子泵的关系研究 ..... 周金泉 张明超 魏志军等 (620)  
钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究 ..... 曹晨亮 王卫 马义兵等 (628)  
钾肥和腐殖酸互作对烤烟有机钾盐指数的影响 ..... 郑东方 许嘉阳 许自成等 (637)  
桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响 ..... 张凯 郑华 陈法霖等 (646)  
荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响 ..... 杨航宇 刘艳梅 王廷璞 (654)  
高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响 ..... 矫丽娜 李志洪 殷程程等 (665)  
链霉菌JD211对水稻幼苗促生作用及土壤细菌多样性的影响 ..... 王世强 魏赛金 杨陶陶等 (673)

### 研究简报

- 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价 ..... 贡璐 张雪妮 冉启洋 (682)  
铁膜对水稻根表面电化学性质和氮磷钾短期吸收的影响 ..... 郑芸芸 李忠意 李九玉等 (690)  
长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化 ..... 夏昕 石坤 黄欠如等 (697)  
滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征 ..... 王合云 李红丽 董智等 (706)

### 信息

- 2015国际土壤年 ..... (696)

封面图片：稻田裂隙二维与三维图像（由张中彬提供）

# 大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究\*

杨玉峰<sup>1</sup> 林青<sup>1</sup> 王松禄<sup>2</sup> 徐绍辉<sup>1†</sup>

(1 青岛大学环境科学系, 山东青岛 266071)

(2 平度市水文局, 山东青岛 266700)

**摘要** 青岛作为北方严重缺水城市之一, 其水资源的合理利用对青岛的发展至关重要。通过对大沽河流域土壤水、地下水的长期观测, 利用简化后的土壤水量平衡方程并结合Hydrus-1d软件对地下水浅埋区农田土壤水与地下水的转化关系进行了分析和计算, 同时得到了该区域土壤水资源量。结果表明, 土壤水分与降雨、地下水位埋深存在较快的响应关系; 土壤水与地下水可以相互补给, 且不同时期具有不同的转化特征: 玉米生长期土壤水与地下水的交换频繁, 且容易出现农田土壤水分渗漏以及地下水位剧烈波动, 期间土壤水补给地下水228.0 mm, 地下水补给土壤水287.5 mm; 而小麦生长期未进行农田灌溉时, 土壤水与地下水几乎为单向联系, 主要由地下水补给土壤水, 且补给量变化较玉米期稳定, 期间土壤水补给地下水70.09 mm, 地下水补给土壤水266.9 mm; 通过计算得到研究区土壤水资源量为439.1万m<sup>3</sup>, 这对于农作物的生长具有重要的作用, 应制定合理的灌溉方案, 最大限度利用土壤水资源, 从而达到农业节水的目的。

**关键词** 土壤水; 地下水; 水量平衡; Hydrus-1d

**中图分类号** S152 **文献标识码** A

作为一个农业大国, 我国农业用水量一直保持较高水平, 其中约占90%的农业用水用作农田灌溉, 且用水效率较低, 平均利用系数仅为0.4<sup>[1]</sup>。土壤水资源极为丰富, 约占大气降水的67.2%<sup>[2]</sup>, 研究表明, 土壤水与地下水转换关系密切, 是水文循环中必不可少的一个环节<sup>[3-5]</sup>。然而, 长期以来, 由于研究目的、手段和方法的不同, 以及含水介质的空间变异等原因, 使得土壤水和地下水动态规律的研究分别在各自独立的领域中发展。随着研究的深入, 人们越来越意识到应将土壤水与地下水作为一个整体来考虑, 才能更全面地认识土壤水、地下水运动规律。朱安宁等<sup>[6]</sup>通过时间序列分析方法将观测得到的平原潮土土壤水分, 地下水位以及降雨量等数据进行分析, 得出了土壤水、地下水位对降雨的响应以及动态变化规律。韩双平等<sup>[7]</sup>选取种植冬小麦和玉米的农田为试验区, 通过人工

改变潜水埋深, 分析并证明了不同地下水埋深条件下土壤水和地下水相互转化关系。宫兆宁等<sup>[8]</sup>归纳了国内外地下水浅埋条件下土壤水分运动和水盐运移研究方法、进展以及成果, 指出地下水通过毛细作用进入土壤层并参与土壤水的循环, 对土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 系统水分循环过程的研究要从单过程分析向多过程综合分析发展。另外, 选取适当的方法研究土壤水与地下水的转化关系, 有效地评价和利用土壤水与地下水, 对缓解我国水资源紧缺问题具有重大现实意义。

本文在田间实地观测资料的基础上, 通过分析降雨、灌溉、土壤水、地下水的动态变化规律并结合Hydrus-1d软件<sup>[9-14]</sup>, 利用简化后的土壤水量平衡方程对农田土壤水和地下水转化关系进行了研究, 研究结果不仅有助于揭示农田水分转化规律, 也可为农田节水灌溉提供一定的科学依据。

\* 国家自然科学基金项目 (41171183)、水利部国家公益性行业专项 (201201024)、青岛市民生计划项目 (13-1-3-132-nsh) 资助

† 通讯作者, E-mail: xsh631201@126.com

作者简介: 杨玉峰 (1988—), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分研究。E-mail: 403966630@qq.com

收稿日期: 2014-05-15; 收到修改稿日期: 2014-10-15

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东省平度市郭庄镇万家村, 地理坐标为 $36^{\circ}36'36''$  N,  $120^{\circ}5'44''$  E, 处于大沽河中游冲积平原区, 海拔高程约为31 m。属暖温带东亚半湿润季风区, 大陆性气候。多年平均降水在601.3 mm, 主要集中于6—9月份, 年蒸发量1 711 mm, 年平均气温12.2 ℃, 最高气温38.6 ℃, 最低气温-18.3 ℃。试验区地下水埋藏较浅, 常年在0.7~3.5 m之间波动, 主要以上层滞水、潜水形式存在。土壤类型主要为砂姜黑土, 土壤质地以砂质壤土和砂质黏壤土(美国制)为主。研究区大部分为夏玉米和冬小麦轮作, 其中夏玉米生长期从6月上旬开始, 结束于10月上旬; 冬小麦生长期从10

月中旬开始, 结束于5月下旬。

### 1.2 试验方法

试验时间分别选取夏玉米和冬小麦一个完整的生长周期, 时间由2012年6月8日至2013年6月1日。试验区在垂直剖面上可划分为三种不同质地的土壤, 其基本理化性质见表1。利用圆盘渗透仪对各层土壤饱和导水率进行原位测定, 用环刀采取原状土样, 获取各层土壤的水分特征曲线和容重。此外, 分别在土壤剖面距地表20、40、60、100、160 cm处设立土壤水分取样点, 一般每10 d取样一次, 降雨或灌溉后加密取样一次。土壤含水量用烘干法进行测定<sup>[15]</sup>。降雨资料和地下水数据来自青岛市水文局观测站记录, 灌溉量及次数参照当地农田实际灌溉情况, 研究期内共灌溉4次, 每次灌溉量80 mm。

表1 研究区土壤颗粒组成及容重

Table 1 Soil particle size composition and bulk density of the soils tested

土壤层次 Soil layer (cm)	土壤质地 Texture	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )
0~40	壤土 Loam	45.31	32.25	22.44	1.46
40~100	砂质黏壤土 Sandy clay loam	46.86	28.09	25.05	1.48
100~160	砂质壤土 Sandy loam	51.53	27.65	20.82	1.51

### 1.3 土壤水储量计算方法

土壤水储量根据下式计算<sup>[16]</sup>:

$$Q = \sum_{i=1}^n \theta_i d_i h_i \quad (1)$$

式中,  $Q$ 为某一土层的土壤水储量 (mm);  $\theta_i$ 为某一土层的土壤质量含水率 (%);  $d_i$ 为对应土层土壤容重 (g cm<sup>-3</sup>);  $h_i$ 为某一土层的厚度 (mm)。

### 1.4 农田蒸散量计算

农田蒸散量包括土壤蒸发量和植物蒸腾量, 利用Hydrus-1d软件中自带的蒸散计算模块对二者进行计算。模型上边界选择大气边界, 接受降雨灌溉补给以及农田蒸散发排泄, 下边界选择自由排水边界, 初始含水量为模拟开始时刻实测的土壤含水量。本研究所需的土壤剖面各层的饱和导水率由圆

盘渗透仪测得, 其他水力学参数由测得的水分特征曲线反演获得。根系吸水模型选择Fedds模型, 根系吸水参数选取Hydrus-1d数据库中的玉米和小麦<sup>[17]</sup>经验值。见表2。

选择联合国粮食及农业组织 (FAO) 推荐的Hargreaves公式, 将逐日气象资料输入Hydrus-1d模型, 最终通过农田蒸散计算模块求得土壤蒸发量与植物蒸腾量值, 用于下一步的水量平衡计算。

### 1.5 地下水与土壤水交换量计算

农田土壤水分在循环过程中主要将大气降水、灌溉和地下水作为补给来源, 而以土壤蒸发和作物蒸腾的形式消耗。如果用土壤水储量的变化表征土壤层水分的变化情况, 在一段时间内, 经典土壤水量平衡方程为:

表2 玉米期和小麦期水分胁迫参数

Table 2 Parameters of water stress during the summer maize and winter wheat seasons

	P0 ( cm )	P0pt ( cm )	P2H ( cm )	P2L ( cm )	P3 ( cm )	r2H ( cm d <sup>-1</sup> )	r2L ( cm d <sup>-1</sup> )
玉米期 Summer maize season	-15	-30	-325	-600	-8 000	0.5	0.1
小麦期 Winter wheat season	0	-1	-500	-900	-16 000	0.5	0.1

注: P0: 根系开始吸水的最高土壤基质势; P0pt: 根系吸水最大可能速率临界土壤基质势; P2H: 蒸腾速率为r2H时的临界土壤水势; P2L: 蒸腾速率为r2L时的临界土壤水势; P3: 根系吸水萎焉点土壤基质势; r2H: 最高潜在蒸腾速率; r2L: 最低潜在蒸腾速率; P0: Maximum soil matric potential when roots start to abstract water from the soil; P0pt: Critical soil matric potential when roots start to abstract water at the maximum possible rate; P2H: Critical soil water potential when soil transpiration rate reaches r2H; P2L: Critical soil water potential when soil transpiration rate reaches r2L; P3: Soil matric potential when root water uptake is at wilting point; r2H: Maximum potential transpiration rate; r2L: Minimum potential transpiration rate

$$\Delta Q = P + \varepsilon + C_m - E_p - R_s - P_r - E - T \quad (2)$$

式中,  $\Delta Q$ 为一段时间内的土壤水储量的变化量, mm;  $P$ 为降水量(灌溉量), mm;  $\varepsilon$ 为土壤水与地下水交换量, mm;  $E_p$ 为雨期蒸发量, mm;  $C_m$ 为水汽凝结量, mm;  $P_r$ 为农田作物截留量, mm;  $R_s$ 为地表径流量, mm;  $P$ 为降水入渗到地下含水层的量, mm;  $E$ 为土壤蒸发量, mm;  $T$ 为植物蒸腾量, mm。

结合研究区农田实际情况进行分析: 研究区属华北平原农田, 地势平坦, 因此降雨后不考虑地表径流。由于雨期蒸发、水汽凝结和农田作物截留量不易观测计算, 且以上数值都较小, 对模型影响不大, 因此这里忽略不计。最后, 研究区内土壤水量平衡方程为:

$$\Delta Q = P + \varepsilon - P_r - E - T \quad (3)$$

$$P_r = P \times \alpha \quad (4)$$

式中,  $\alpha$ 为降雨入渗系数, 根据研究区土壤质地情况, 选取 $\alpha=0.21$ 。

因此,

$$\varepsilon = \Delta Q + P_r + E + T - P \quad (5)$$

土壤水资源指包气带土层中具有利用价值的结合水和毛细水, 可被作物根系吸收和利用。根据上式, 土壤水资源量可表示为:

$$W = E + T + \Delta Q \quad (6)$$

式中,  $W$ 为土壤水资源量, mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤水分对降水及地下水位的动态响应

作物种类、不同时间的降水强度、地下水位波动以及气象条件, 共同决定了土壤含水量在时间尺度上具有很强的变异性<sup>[18-20]</sup>。试验区年蒸发量大于降水量, 年内降水量分布极不均匀, 春、冬季降水稀少, 多发旱情; 降水虽集中在夏、秋季, 但蒸发量在此段时间内达到峰值, 受这些因素影响, 试验区土壤水分随时间的变化呈现一定的规律性。图1为夏玉米—冬小麦轮作期土壤水分动态曲线。

根据图1, 可以将夏玉米—冬小麦轮作期土壤水分的变化分为以下几个阶段:

第一阶段(6—7月)。该段时期开始迎来集中性降雨, 同时玉米需水量和蒸发量较小, 因此土壤水分逐渐增加并储存于土壤层。同时, 经历较强降水后, 降雨入渗使得地下水位升高, 地下水通过毛细作用进入底层的土壤中, 使100 cm和160 cm两处的土壤含水量增加明显。

第二阶段(8—10月上旬)。此时虽然降雨量迎来高峰, 但辐射加强, 农田蒸发加剧, 而且正处在夏玉米生长的抽穗-灌浆期, 所需水分大幅增加, 每次降雨后, 土壤水分很快消耗于地面蒸发和植物蒸腾作用, 因此土壤含水量下降较快, 且波动剧烈。

第三阶段(10月中旬—3月)。该期间降水频次低,雨强较小,降水对各土层土壤含水量影响较低,土壤水分始终处于较稳定的状态,农田蒸散发是该阶段土壤含水量变化的主要影响因素。如图所示,11月份40 cm和60 cm处土壤含水量的增加主要是由该月两次降雨(17 mm和25 mm)所造成。

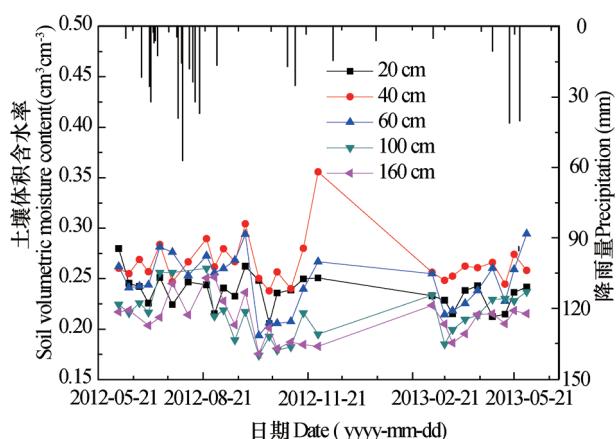


图1 夏玉米—冬小麦轮作期土壤水分变化曲线

Fig.1 Soil water variation curve of the farmlands during the summer maize - winter wheat rotation period

图2为研究区夏玉米—冬小麦轮作期地下水位埋深的变化情况。可以看出,玉米期降水和蒸散量大,地下水位埋深波动剧烈,进入汛期后,地下水位埋深逐渐降低,经历8月份的几次降雨后(累积降雨量183 mm),地下水位埋深达到年内的最低值(0.82 m);而在小麦期内,降水稀少,蒸散相对减弱,地下水位埋深较为稳定。由于小麦灌浆期需水量大,且降水量无法满足作物生长需求,地下水通过毛细作用上升补给土壤水,使地下水位埋深达到年内的最高值(3.08 mm)。总体而言,地下水位埋深的波动情况大体也分为四个阶段,恰好与土壤水分的变化阶段相对应,结合图1可知土壤水分含量与降水、地下水位埋深存在动态响应关系。

总之,试验区不同土层水分含量随时间变化的规律大体相同。需要指出的是,40~60 cm土层含水量全年波动较其他土层最小,这是因为该层土壤的黏粒含量较高,持水能力最强,水分容易滞留在该层,因此当降水稀少,各层土壤含水量普遍下降的情况下,该层土壤对于植物的生长发育起着至关重要的作用。并且,该土层对降水灌溉后是否会产生渗漏以及土壤水分如何向上运动等也具有重要的影响<sup>[21]</sup>。

第四阶段(4—5月)。小麦进入抽穗灌浆时期,作物需水量增加,降水仍然稀少,气候干燥,土壤含水量仍然较低;图中含水量增高的波动主要是由3月28日的小麦春灌引起。进入6月后,随着小麦的收割和汛期的来临,土壤含水量开始逐渐增加。

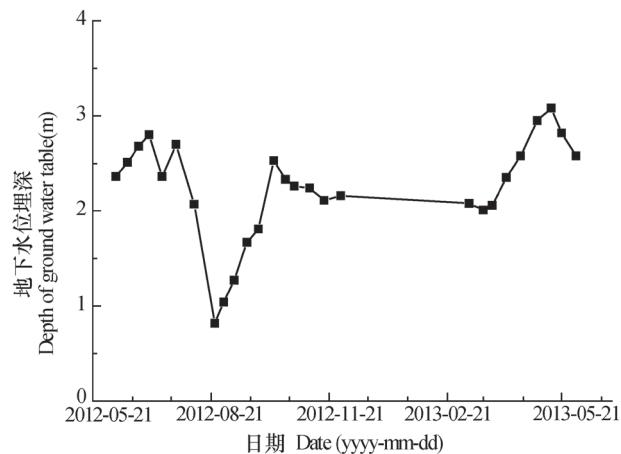


图2 夏玉米—冬小麦轮作期地下水位埋深变化情况

Fig.2 Changes in ground water table during the summer maize and winter wheat rotation season

## 2.2 土壤水储量总体变化情况

土壤水储量是评价土壤湿度的重要指标之一,其便于与降水量、农田蒸散量、灌溉量等进行比较,且土壤水储量的变化情况可以准确反映农田在不同时期的需水规律。

土壤水储量出现的若干次峰值均是降雨或灌溉的结果,在无降水或灌溉的时候,由于作为蒸腾蒸发,储水量是持续下降的。从图3可以看出,玉米生长期土壤水储量波动剧烈,最大值达483.6 mm,最小值为351.7 mm,主要是由于该时期处于汛期,降雨量较大;其次,夏季温度较高,太阳辐射强度较大,农田蒸散强烈;再者,此时地下水位变动明显且埋深较浅,因此,土壤水储量变化处于极为不稳定状态,变差系数为9.97%。而小麦生长期,降雨量稀少,温度偏低,农田蒸散值不高,地下水位埋深较大且变化幅度较小,因此土壤水储量波动较为平稳,最大值为382.8 mm,最小值为313.2 mm,变差系数为6.55%。这进一步说明土壤水分的变化与降雨,农田蒸散以及地下水位埋深有着密切的联系。

## 2.3 土壤剖面水分含量与地下水动态分析

试验期间,研究区降雨量偏低,为517 mm,

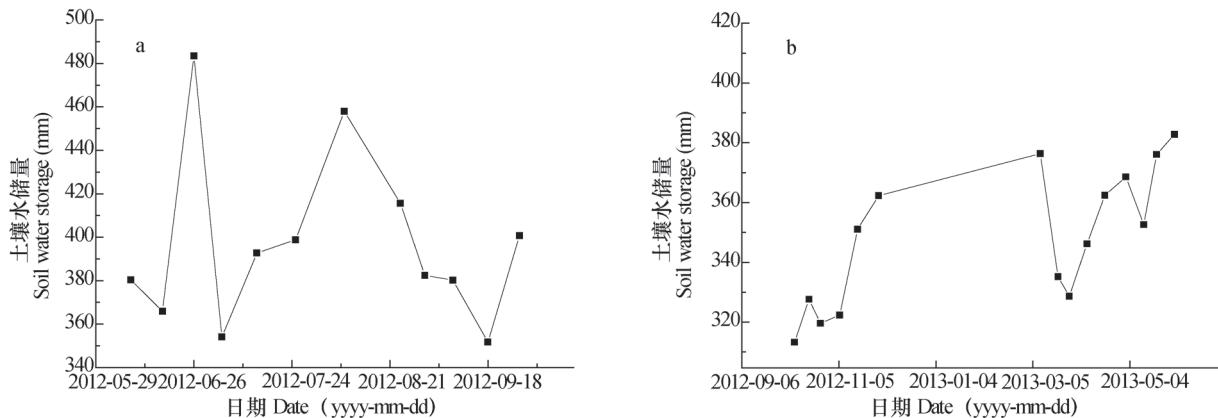


图3 玉米生长期 (a) 和小麦生长期 (b) 土壤水储量变化

Fig.3 Changes in soil water storage during the summer maize (a) and winter wheat (b) seasons

其中玉米期降雨358 mm, 小麦期降雨159 mm。表3列出了研究区玉米和小麦生长期内剖面各层土壤含水量、剖面土壤水储量及地下水位埋深的统计情况。

统计结果表明, 玉米生长期内0~20 cm土壤含水量很低, 40~60 cm土层最高, 整个剖面含水率呈现先升高, 后降低, 最后趋于平稳的状态, 由此可推测出研究区土壤零通量面大致位于40~60 cm之间, 零通量面以上, 水分通过土壤蒸发和植物蒸腾向上运动; 零通量面以下, 土壤水分向下运动, 形成入渗补给地下含水层。由变差系数可以看出, 表层土壤(0~20 cm)含水量随时间的波动强烈, 因为该层受降水和灌溉的影响较大, 随着土壤深度的增加, 土壤水分波动幅度减弱, 以往很多研究认为表层土壤含水量对降水的变化最为敏感, 雨后该层土壤水由于蒸发作用消耗也快, 因此表层变差系数要高于深层, 且土壤水分变化较深层活跃<sup>[22-23]</sup>; 40~100 cm土壤层由于存在黏土层, 持水力较强, 含水量最高, 土壤含水量变化幅度平缓; 100~200 cm为含砂壤土, 含水量较40~100 cm土层略低, 且变差系数较大(分别为26.67、22.59), 含水量变幅较高, 主要由于该层距离地下含水层较近, 土壤水与地下水交换作用强烈, 受地下水向上补给作用显著。玉米期剖面土壤水总储量为397.0 mm, 处于较低水平, 主要由于夏季农田蒸发强烈, 作物吸水明显; 同时, 变差系数较低(9.97), 表明降雨、灌溉以及地下水可以及时并充足地补给土壤层, 使土壤水储量保持均衡状态。期间地下水埋深均值为1.88 m, 属地下水浅埋区, 变差系数高达36.17%, 说明地下水和土壤水交换

频繁。

小麦生长期内, 土壤各层含水量的大小顺序与玉米期相同, 该时期内由于蒸发蒸腾作用较玉米期相对减弱, 表层土壤含水量较玉米期高, 其他层土壤含水量与玉米期相比均有不同程度的降低, 主要是因为该段时间内降雨量较少且地下水埋深较大。土壤水储量(348.4 mm)处于较低水平, 这与该段时间降水稀少有密切关系。从变差系数来看, 表层土壤含水量随时间的变化幅度也较大, 随着土壤深度的增加, 土壤含水量变化幅度减弱, 40~100 cm土层有一定程度的升高, 这是因为该期间降水量较低, 地下水埋深增大(最大埋深达3.08 m), 小麦所需水分主要来源于40~100 cm土层, 因而该层含水量变幅升高; 而100~200 cm含水量变化较玉米期平稳, 此时, 地下水位降低, 地下水向土壤的补给作用较之玉米期有一定程度的减弱, 使得接近地下含水层的土壤含水量的变化趋于平稳。

综上所述, 地下水浅埋区夏玉米-冬小麦轮作期间, 土壤水与地下水有明显的相互转化关系, 而且对农作物需水有较大程度的影响。

#### 2.4 地下水与土壤水的交换量

一般而言, 当地下水埋深小于极限埋深且大于土壤作物根系深度时, 地下水和土壤水存在频繁的相互交换关系, 浅埋区地下水变化对土层的含水量和水势有明显影响, 此时, 建立土壤水分模型时应考虑地下水的作用。研究区土壤水与地下水关系属于这种类型, 此种情形下确定地下水与土壤水交换量对农业水资源的合理利用有重要意义。

土壤水与地下水交换量的计算时间间隔设定为两次野外取样观测的间隔时间, 根据式(3)、式

表3 玉米期、小麦期剖面各层土壤含水率、剖面土壤水储量和地下水埋深统计

Table 3 Statistics of soil moisture content, in various soil layers of the profile, soil water storage of the profile and depth of groundwater table during the summer maize and winter wheat seasons

统计量 Statistic	体积含水量 $\times 100$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )						土壤水储量 <sup>①</sup> ( mm )	地下水埋深 <sup>②</sup> ( m )
	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 100 cm	100 ~ 160 cm	160 ~ 200 cm		
平均值 Mean	16.38	24.25	27.00	26.26	24.45	24.04	397.0	1.88
玉米期 Summer maize season	标准差 Standard deviation	4.04	1.74	1.64	1.65	6.52	5.43	39.57
	变异系数 Coefficient of variation (%)	24.66	7.18	6.07	6.28	26.67	22.59	9.97
	平均值 Mean	17.32	23.28	26.28	23.41	20.70	19.94	348.4
小麦期 Winter wheat season	标准差 Standard deviation	6.02	1.45	2.82	2.83	2.17	1.58	22.83
	变异系数 Coefficient of variation (%)	34.76	6.23	10.73	12.09	10.48	7.92	6.55
	平均值 Mean	34.76	6.23	10.73	12.09	10.48	7.92	14.91

注: ①Soil water storage; ②Depth of groundwater table

(4)、式(5)即可求得研究区土壤水和地下水在取样间隔时间内的交换量。图4为玉米生长期和小麦生长期土壤水与地下水交换量的变化情况。

由图4a可知,玉米生长期土壤水与地下水交换频繁,其中正值表示地下水对土壤水产生补给作用的量,负值表明农田土壤水分渗漏到地下含水层的量。在玉米播种拔节期间,由于降雨稀少,作物所需水分仅靠土壤水提供是不够的,土壤水分减少到一定程度,地下水通过毛细作用补给土壤水,因此初期地下水补给土壤水量达138.2 mm。而玉米生长期初期一段时间产生较多的土壤渗漏,这主要是人工灌溉所造成的,产生了水资源浪费。当进入汛期后,由于降雨量增加,地下水对土壤水的补给作用逐渐减小,而且较大幅度的降雨可以迅速入渗补给到地下水,造成农田水分的渗漏,一次采样间隔最大渗漏量为81.38 mm。由上述分析可知,当降雨稀少时,由于农田蒸发和植物蒸腾的原因,土壤水分短时间内需要获得地下水的补给来维持水量平衡;当降雨足够满足农田蒸发和植物蒸腾时,容易产生渗漏。

根据研究区当地农田灌溉规律,小麦生长期进行了4次灌溉,图中4个高值均为农田灌溉量加上降雨量。从图4b可以看出,在未进行灌溉的时间内,土壤水与地下水几乎为单向联系,主要由地下水补给土壤水,且补给量变化较玉米期稳定,这与该期间内降雨稀少,农田蒸散减弱有密切联系。由于12月、1月、2月为越冬期,蒸散较弱,作物需水不明显,因此暂停取样,期间地下水缓慢补给土壤水且补给量较低,图4b中峰值(79.31 mm)为3个月间隔时间内地下水补给土壤水的积累量。小麦在播种—拔节期内,地下水补给土壤水量缓慢升高,这与作物需水量缓慢升高的规律是一致的;而小麦进入抽穗—灌浆期后,作物需水量明显上升,土壤水分消耗较快,因而地下水补给量较其他时期升高。图4b中交换量负值表明,每进行一次农田灌溉,均会使农田土壤水分产生不同程度的渗漏(0.829~41.14 mm),说明传统的漫灌方式容易造成水资源的浪费。

表4为作物生长期农田土壤水与地下水交换累积量,玉米生长期降水强度大,农田水分产生渗漏

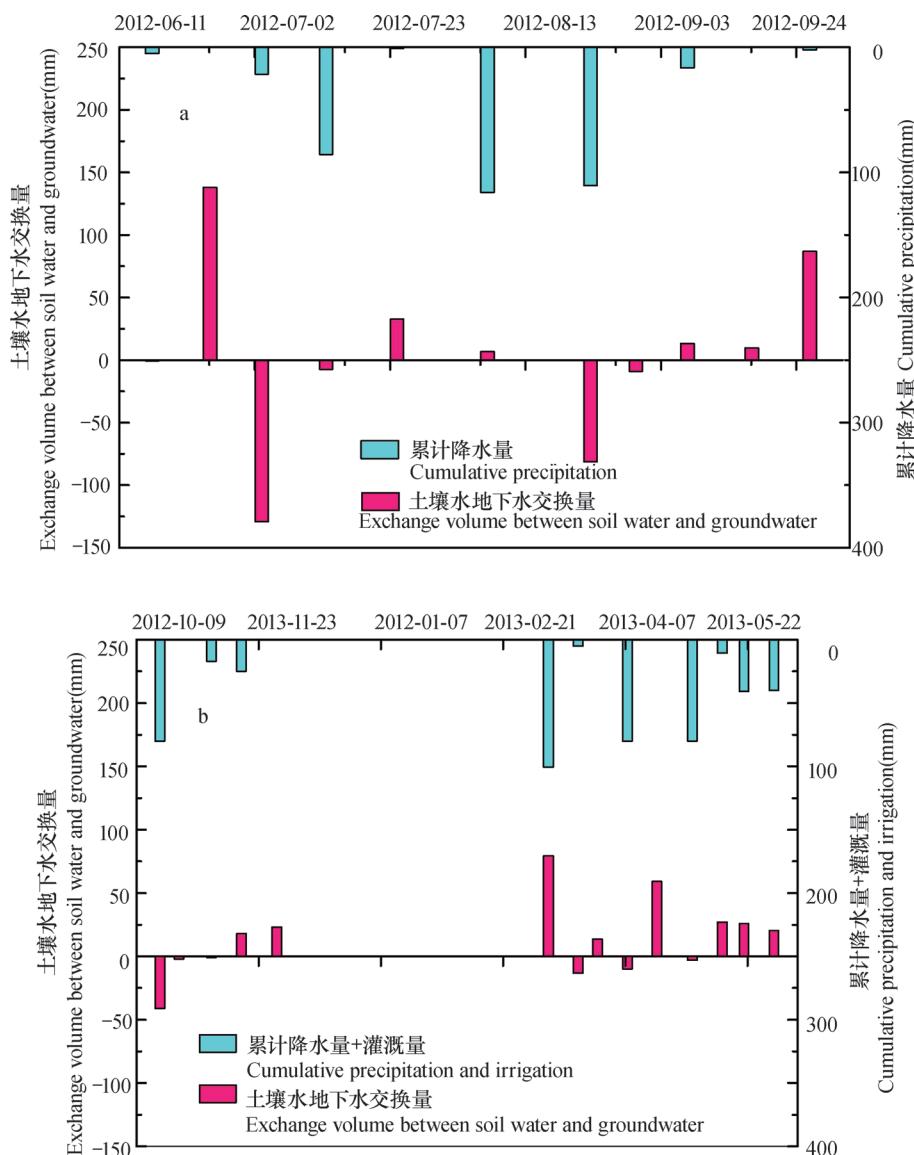


图4 玉米生长期 (a) 和小麦生长期 (b) 土壤水地下水交换量变化

Fig. 4 Volumes of water exchange between soil water and groundwater during the summer maize (a) and winter wheat (b) season

表4 作物生长期农田土壤水与地下水交换累积量

Table 4 Cumulative volumes of water exchange between soil water and groundwater during the winter wheat and summer maize seasons

	土壤水补给地下水 Water supplementation from soil water to groundwater ( mm )	地下水补给土壤水 Water supplementation from groundwater to soil water ( mm )
玉米生长期 Summer maize season	228.0	287.5
小麦生长期 Winter wheat season	70.09	266.9
夏玉米—冬小麦轮作期 Summer maize and winter wheat seasons	298.1	554.4

进而补给地下含水层(228.0 mm), 同时汛期地下水埋深较浅, 当土壤蒸发量和作物需水量较高时, 地下水会对土壤层进行补给(287.5 mm); 小麦生长期降水量偏低且雨强小, 因而降雨入渗很难到达地下含水层, 因此土壤水对地下含水层补给来源主要为农田灌溉, 且补给量较低, 为70.09 mm, 其他时间则需要地下水通过毛细作用对土壤层进行补给。夏玉米-冬小麦轮作期地下水对土壤共产生了256.3 mm的补给量, 说明在地下水浅埋区, 地下水对土壤的补给占土壤水资源量的很大一部分。

## 2.5 土壤水资源量及利用

由于研究区农田作物主要为冬小麦和夏玉米, 玉米的根系主要分布在50 cm以上的土层中, 而冬小麦虽然根系深通常超过100 cm(最大甚至可达到200 cm), 但根系吸水的影响范围主要还是集中在160 cm土层以内, 因而最终确定土壤水资源量地计算深度为160 cm。根据土壤水储量和农田蒸散量的计算方法求出土壤蒸发量、植物蒸腾量、土壤水储量变化量代入公式(6), 求得玉米生长期、小麦生长期和夏玉米-冬小麦轮作期内0~160 cm的土壤水资源量, 如表5所示。

表5 作物生长期农田土壤水资源计算结果

Table 5 Soil water storage and variation during the winter wheat and summer maize seasons

	土壤水储量变化量 Change in soil water storage ( mm )	蒸散量 Evapotranspiration ( mm )	土壤水资源量 Soil water storage ( mm )
玉米生长期 Summer maize season	20.40	370.0	390.4
小麦生长期 Winter wheat season	-17.90	505.6	487.7
夏玉米-冬小麦轮作期 Summer maize and winter wheat seasons	2.48	875.6	878.1

可以看出, 由于地下水埋藏较浅, 研究区夏玉米-冬小麦轮作期内土壤水资源量较高, 达到878.1 mm。研究区目前共有农田500 hm<sup>2</sup>, 将计算得到的W值乘以农田总面积, 最终得出研究区土壤水资源量为439.1万m<sup>3</sup>, 可见, 土壤水资源量较高, 对于农作物的生长具有重要的作用。结合上述研究结果推出, 农田在汛期应对降水进行拦蓄, 避免造成土壤水分大量渗漏和农田养分淋失; 在干旱期进行灌溉时, 应在充分利用土壤水资源的同时改进灌溉技术, 根据作物不同的生长阶段制定合理的灌溉措施和灌溉量, 从而达到节约水资源的目的。

## 3 结 论

通过对大沽河流域地下水浅埋区土壤水-地下水转化的研究, 得出土壤水分随时间的变化呈现一定的规律性且土壤水分与降水、地下水位存在动

态响应关系。夏玉米-冬小麦轮作期间, 对土壤水储量变化的计算反映出土壤水分的变化与降水、农田蒸散以及地下水位有密切的联系; 同时, 观测资料的统计分析也表明, 土壤水与地下水有明显的相互转化关系, 并对农作物需水有较大程度的影响。玉米生长期由于降雨、农田蒸散等作用较强, 土壤水与地下水的交换频繁, 土壤水补给地下水228.0 mm, 地下水补给土壤水287.5 mm, 且容易出现农田土壤水分渗漏以及地下水位剧烈波动现象, 地下水位埋深的变差系数为36.17%; 小麦生长期由于降雨稀少, 农田蒸散减弱等原因, 土壤水与地下水几乎为单向联系, 主要由地下水补给土壤水, 补给量为266.9 mm, 且补给量变化较玉米期稳定。通过水量均衡计算获知地下水浅埋区土壤水资源量丰富为439.1万m<sup>3</sup>, 如何有效调控土壤水资源的输入输出, 增加有效补充, 减少无效损失, 需要深入研究, 从而更好地指导农业节水灌溉。

本文以一定时期土壤水储量的变化为核心表征土壤水与地下水的转化关系, 从定量的角度揭示了土壤水与地下水的相互转化规律, 然而土壤水与地下水的运动转化规律复杂多变, 并且受多重因素影响, 因此还需进一步深入研究, 今后可以将土壤水与地下水相关数值模拟软件进行耦合, 从而更为准确系统地描述土壤水与地下水的运动转化规律。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 许平. 我国农业用水的历史变化及可持续利用问题. 中国农村水利水电, 2008 (10) : 54—57. Xu P. The history of agricultural water consumption and sustainable utilization of agricultural water resources in China (In Chinese). China Rural Water and Hydropower, 2008 (10) : 54—57
- [ 2 ] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 2006. Wang D C, Zhang R Q, Shi Y H, et al. The course of general hydrogeology (In Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006
- [ 3 ] Healy R W, Cook P G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10: 91—109
- [ 4 ] Zhang J, van Heyden J, Bendel D, et al. Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19: 1487—1502
- [ 5 ] 杨建峰, 万书勤, 邓伟, 等. 地下水浅埋条件下包气带水和溶质运移数值模拟研究述评. *农业工程学报*, 2005, 21 (6) : 158—165. Yang J F, Wan S Q, Deng W, et al. Review of numerical simulation of soil water flow and solute transport in the presence of a water table (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21 (6) : 158—165
- [ 6 ] 朱安宁, 张佳宝, 赵炳样, 等. 黄泛区潮土土壤水和地下水的动态变化及其对降雨的响应. *灌溉排水学报*, 2004, 23 (3) : 5—8. Zhu A N, Zhang J B, Zhao B Z, et al. Soil water and groundwater dynamics responses to precipitation in the flooding area of yellow river (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23 (3) : 5—8
- [ 7 ] 韩双平, 荆恩春, 王新忠, 等. 种植条件下土壤水与地下水相互转化研究. *水文*, 2005, 25 (2) : 9—13. Han S P, Jing E C, Wang X Z, et al. Transformation between soil water and groundwater under the condition of planting (In Chinese). *Hydrology*, 2005, 25 (2) : 9—13
- [ 8 ] 宫兆宁, 宫辉力, 邓伟, 等. 浅埋条件下地下水—土壤—植物一大气连续体中水分运移研究综述. *农业环境科学学报*, 2006, 25 (增刊) : 365—373. Gong Z N, Gong H L, Deng W, et al. An overview of water movement in groundwater-soil-plant-atmosphere continuum with shallow water table (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (Suppl.) : 365—373
- [ 9 ] 王鹏, 宋献方, 袁瑞强, 等. 基于Hydrus-1d模型的农田SPAC系统水分通量估算——以山西省运城市董村农场为例. *地理研究*, 2011, 30 (4) : 622—634. Wang P, Song X F, Yuan R Q, et al. Water flux estimation in SPAC System of farmland using Hydrus-1d model: A case of Dongcun farm in Yuncheng City, Shanxi Province (In Chinese). *Geographical Research*, 2011, 30 (4) : 622—634
- [ 10 ] 陈宝根, 王仕琴, 宋献方. 一维土壤水分运动模拟在土壤水分特征研究中的应用——以华北平原衡水实验站为例. *水文*, 2011, 31 (3) : 64—70. Chen B G, Wang S Q, Song X F. Application of 1-D soil water movement simulation in research on soil water characteristics: A case of Hengshui experimental station (In Chinese). *Hydrology*, 2011, 31 (3) : 64—70
- [ 11 ] 王水献, 周金龙, 余芳, 等. 应用hydrus-1d模型评价土壤水资源量. *水土保持研究*, 2005, 12 (2) : 36—38. Wang S X, Zhou J L, Yu F, et al. Application of HYDRUS-1D model to evaluating soil water resource (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12 (2) : 36—38
- [ 12 ] 李玮, 何江涛, 刘丽雅, 等. Hydrus-1d软件在地下水污染风险评价中的应用. *中国环境科学*, 2013, 33 (4) : 639—647. Li W, He J T, Liu L Y, et al. Application of Hydrus-1D Software in groundwater contamination risk assessment (In Chinese). *China Environmental Science*, 2013, 33 (4) : 639—647
- [ 13 ] 刘建军, 王全九, 王卫华, 等. 利用hydrus-1d反推土壤水力参数方法分析. *世界科技研究与发展*, 2010, 32 (2) : 173—175. Liu J J, Wang Q J, Wang W H, et al. Inverse solution soil hydraulic parameters and verification using Hydrus-1D model (In Chinese). *World Sci-Tech Research and Development*, 2010, 32 (2) : 173—175
- [ 14 ] Twarakavi N K C, Simunek J, Seo S. Evaluating interactions between groundwater and vadose zone using the HYDRUS-based flow package for MODFLOW. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7 (2) : 757—768

- [ 15 ] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006. Shao M A, Wang Q J, Huang M B. Soil physics ( In Chinese ) .Beijing: Higher Education Press, 2006
- [ 16 ] 赵秀兰, 延晓东. 近20年华北地区土壤水储量变化趋势及水分管理与调配对策. 气候与环境研究, 2006, 11 ( 3 ) : 371—379. Zhao X L, Yan X D. The trend of soil moisture storage in the last 20 years and its countermeasures of water management and regulation over north China ( In Chinese ) . Climatic and Environmental Research. 2006, 11 ( 3 ) : 371—379
- [ 17 ] Šimůnek J, Šejna M, Saito H, et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Department of Environmental Sciences University of California Riverside, California, 2013, Version 4.16
- [ 18 ] 徐力刚, 杨劲松, 张奇. 冬小麦种植条件下土壤水盐运移特征的数值模拟与预报. 土壤学报, 2005, 42 ( 6 ) : 923—929. Xu L G, Yang J S, Zhang Q. Numerical simulation and forecasting of soil water and salt regime under winter wheat crop plantation ( In Chinese ) . Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 ( 6 ) : 923—929
- [ 19 ] Ersahin S, Brohi A R. Spatial variation of soil water content in topsoil and subsoil of a Typic Ustifluvent. Agricultural Water Management, 2006, 83 ( 1/2 ) : 79—86
- [ 20 ] 李锦秀, 肖洪浪. 流域尺度土壤水研究进展. 中国沙漠, 2006, 26 ( 4 ) : 536—542. Li J X, Xiao H L. Review of soil water research at river basin scale ( In Chinese ) . Journal of Desert Research, 2006, 26 ( 4 ) : 536—542
- [ 21 ] 李韵珠, 胡克林. 蒸发条件下黏土层对土壤水和溶质运移影响的模拟. 土壤学报, 2004, 41 ( 4 ) : 493—502. Li Y Z, Hu K L. Simulation for the effect of clay layer on the transport of soil water and solutes under evaporation In Chinese. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 ( 4 ) : 493—502
- [ 22 ] 李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析. 应用生态学报, 2003, 14 ( 4 ) : 515—519. Li H J, Wang M B, Chai B F. Spatial and temporal characteristics of soil moisture dynamics in loess plateau ( In Chinese ) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 ( 4 ) : 515—519
- [ 23 ] 王晓燕, 陈洪松, 王克林, 等. 不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究. 水土保持学报, 2006, 20 ( 2 ) : 110—113. Wang X Y, Chen H S, Wang K L, et al. Spatio-temporal dynamic change of soil water in sloping land with different use modes in red soil region ( In Chinese ) . Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 ( 2 ) : 110—113

## TRANSFORMATION BETWEEN SOIL WATER AND SHALLOW GROUNDWATER IN THE MIDDLE REACHES OF THE DAGU RIVER

Yang Yuzheng<sup>1</sup> Lin Qing<sup>1</sup> Wang Songlu<sup>2</sup> Xu Shaohui<sup>1†</sup>

( 1 Department of Environmental Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China )

( 2 Hydrological Bureau of Pingdu, Qingdao, Shandong 266700, China )

**Abstract** Qingdao is one of the cities in North China, running short of water supply. So it is very important to preserve and save water resources for Qingdao's sustainable development. In this paper, on the basis of a large number of field experiments and long-term stationary observations conducted in farmlands in the Dagu River Basin in Qingdao, a series of basic information, such as soil moisture, groundwater table depth, soil physicochemical properties, precipitation, irrigation, meteorology and some others were acquired for analysis and computation with the soil water balance equation coupled with the Hydrus-1d software to explore relationship between farmland soil water and groundwater in areas with shallow groundwater table, and further to determine quantity of the soil water resources in this region. Results show that soil moisture regime responds quickly to precipitation and depth of groundwater table; soil water and groundwater supplements each other mutually; and the transformation varies in characteristic with the season. During the corn growing season, soil water and groundwater exchanges frequently, as a result, soil water leaching

and drastic fluctuation of groundwater table is likely to occur. During this period, soil water supplements groundwater with 228.0 mm of water and the latter does the former with 287.5mm, while during the wheat growing season, as there is no irrigation done, the relationship of mutual supplementation almost becomes that of one-way supplementation, that is, from groundwater to soil water, quite stable in rate, compared to the corn growing season, soil water supplies groundwater with 70.09 mm and the latter does the former with 266.9 mm. Through calculation, the soil water resource in the study area was worked out to be 4.395 million cubic meters and plays an important role in guaranteeing crops growth. It is essential to formulate a reasonable irrigation scheme so as to make the best use of the soil water resources, and to achieve the goal of water saving agriculture.

**Key words** Soil water; Ground water; Water balance; Hydrus-1d

(责任编辑: 汪枞生)

## CONTENTS

**Reviews and Comments**

- Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens ..... Cai Zucong, Zhang Jinbo, Huang Xinqi, et al. ( 475 )

A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow ..... Zhang Zhongbin, Peng Xinhua ( 488 )

**Research Articles**

- Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China ..... Wen Leilei, Zheng Fenli, Shen Haiou, et al. ( 498 )

Construction of an index set for predicting thickness of active layer of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and for mapping ..... Chen Jike, Zhao Yuguo, Zhao Lin, et al. ( 506 )

Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuogou Glacier foreland of Gongga Mountain ..... Yang Zijiang, Bing Haijian, Zhou Jun, et al. ( 515 )

Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors ..... Liao Dan, Yu Dongsheng, Zhao Yongcun, et al. ( 526 )

Spatio-temporal variation of soil temperature and soil moisture regime in Hebei Province ..... Cao Xianghui, Lei Qiuliang, Long Huaiyu, et al. ( 536 )

Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment ..... Fu Tonggang, Chen Hongsong, Wang Kelin ( 546 )

Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River ..... Yang Yuzheng, Lin Qing, Wang Songlu, et al. ( 556 )

Determination of nitrogen and oxygen isotope ratio of nitrate in water with a chemical conversion method ..... Wang Xi, Cao Yacheng, Han Yong, et al. ( 565 )

Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using  $^{13}\text{C}$  pulse labeling technique ..... Liu Ping, Jiang Chunyu, Li Zhongpei ( 574 )

Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields ..... Ci En, Wang Liange, Ding Changhuan, et al. ( 585 )

Residual of applied  $^{15}\text{N}$  fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization ..... Zhao Wei, Liang Bin, Zhou Jianbin ( 595 )

Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system ..... Lu Yanhong, Liao Yulin, Zhou Xing, et al. ( 605 )

Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system ..... Ji Jianhua, Hou Hongqian, Liu Yiren, et al. ( 618 )

Relationship between exudation of nitrification inhibitor MHPP and plasma membrane proton pump of sorghum root ..... Zhou Jinquan, Zhang Mingchao, Wei Zhijun, et al. ( 527 )

Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field ..... Cao Chenliang, Wang Wei, Ma Yibing, et al. ( 635 )

Effects of interaction between potassium and humic acid on index of organic potassium salt in flue-cured tobacco ..... Zheng Dongfang, Xu Jiayang, Xu Zicheng, et al. ( 645 )

Impacts of replacement of *Pinus* with *Eucalyptus* on soil nutrients and enzyme activities ..... Zhang Kai, Zheng Hua, Chen Falin, et al. ( 653 )

Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert areas ..... Yang Hangyu, Liu Yanmei, Wang Tingpu ( 663 )

Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation ..... Jiao Lina, Li Zhihong, Yin Chengcheng, et al. ( 671 )

Effect of *Streptomyces* JD211 promoting growth of rice seedlings and diversity of soil bacteria ..... Wang Shiqiang, Wei Sajin, Yang Taotao, et al. ( 681 )

**Research Notes**

Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set ..... Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang ( 689 )

Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice roots ..... Zheng Yunyun, Li Zhongyi, Li Jiuyu, et al. ( 695 )

The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization ..... Xia Xin, Shi Kun, Huang Qianru, et al. ( 705 )

Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation ..... Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et al. ( 712 )

**Cover Picture:** Two dimensional and three dimensional images of soil cracks in paddy field ( by Zhang Zhongbin )

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：汪枞生 卢 萍 檀满枝

## 土壤学报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 3 May, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会

地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008

电话：025-86881237

E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica

Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China

Tel: 025-86881237

E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正

Editor-in-Chief Shi Xuezheng

主 管 中国科学院

Superintended by Chinese Academy of Sciences

主 办 中国土壤学会

Sponsored by Soil Science Society of China

承 办 中国科学院南京土壤研究所

Undertaken by Institute of Soil Science,

Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社

Published by Science Press

地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Add: 16 Donghuangchenggen North Street,

Beijing 100717, China

印 刷 装 订 北京中科印刷有限公司

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company

总 发 行 科 学 出 版 社

Distributed by Science Press

地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Add: 16 Donghuangchenggen North Street,

Beijing 100717, China

电 话：010-64017032

Tel: 010-64017032

E-mail: journal@mail.sciencep.com

E-mail: journal@mail.sciencep.com

国 外 发 行 中国 国际图书贸易总公司

Foreign

China International Book Trading Corporation

地 址：北京 399 信箱 邮政编码：100044

Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号:CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定 价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行

ISSN 0564-3929



9 770564 392156