

DOI: 10.5846/stxb201606011059

陈丽,郝晋珉,陈爱琪,李牧,高阳,管青春,王宏亮.基于二元水循环的黄淮海平原耕地水源涵养功能研究.生态学报,2017,37(17):5871-5881.

Chen L, Hao J M, Chen A Q, Li M, Gao Y, Guan Q C, Wang H L. Study on the water conservation function of cultivated land based on dualistic water cycle in Huang-Huai-Hai Plain. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5871-5881.

基于二元水循环的黄淮海平原耕地水源涵养功能研究

陈 丽^{1,2}, 郝晋珉^{1,2,*}, 陈爱琪^{1,2}, 李 牧^{1,2}, 高 阳^{1,2}, 管青春^{1,2}, 王宏亮^{1,2,3}

1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

2 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193

3 呼和浩特市国土资源局, 呼和浩特 010010

摘要:水源涵养功能是陆地生态系统的重要功能类型之一。黄淮海平原耕地数量巨大,耕地利用模式典型,研究其水源涵养功能,对于调控区域水资源,推动耕地可持续利用有重要作用。从耕地利用角度出发,基于整个系统二元水循环过程,构建了黄淮海平原耕地水源涵养功能研究基本框架,并应用 SCS-CN 模型,结合研究区耕地覆盖数据、气候数据、土壤数据对黄淮海平原耕地水源涵养功能进行了评价。研究表明:耕地利用过程中的耕地水源涵养功能认识,应从理想水源涵养能力、有效水源涵养能力和净水源涵养能力 3 个层次展开;黄淮海平原耕地水源涵养功能效应在上述各层级上均表现出正向性,耕地水源涵养能力分别为 1890.74、1127.76、464.62 亿 m^3 ;空间上,黄淮海平原耕地水源涵养功能具有明显的空间分异性,北部和东南部地区耕地水源涵养能力较强,中部和西南部地区耕地水源涵养能力较弱。研究结果不仅为耕地生态功能理论研究提供新思考点,同时也为耕地水资源有效调控以及耕地生态补偿制定提供参考和支撑。

关键词:水源涵养功能;二元水循环;耕地;黄淮海平原

Study on the water conservation function of cultivated land based on dualistic water cycle in Huang-Huai-Hai Plain

CHEN Li^{1,2}, HAO Jinmin^{1,2,*}, CHEN Aiqi^{1,2}, LI Mu^{1,2}, GAO Yang^{1,2}, GUAN Qingchun^{1,2}, WANG Hongliang^{1,2,3}

1 College of Resources Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, The Ministry of Land and Resources, Beijing 100193, China

3 Hohhot Bureau of Land and Resources, Hohhot 010010, China

Abstract: Water conservation as an important ecosystem function has caused a rising interests in the scientific community in recent years. Huang-Huai-Hai Plain has a substantial cultivated land area and typical cultivated land-use patterns. So, the research on water conservation function of cultivated land in this area is important for regulating the regional water resources and promoting the sustainable utilization of cultivated land. We constructed a basic research framework of the water conservation function of cultivated land in Huang-Huai-Hai Plain, which based on the dualistic water cycle process of cultivated land use systems. The water conservation function and spatial distribution of cultivated land in the Huang-Huai-Hai Plain was evaluated with cultivated land cover data, climate data, and soil data, by using the Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) model. The results suggested that the water conservation function of cultivated land should be identified by the ideal water conservation ability, effective water conservation ability, and net water conservation ability, which were 1890.74×10^8 , 1127.76×10^8 , and $464.62 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively, in Huang-Huai-Hai Plain in 2012. And the water retention function of cultivated land showed obvious spatial heterogeneity: It was strong in the northern and

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAD06B01)

收稿日期:2016-06-01; 网络出版日期:2017-04-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jmhao@cau.edu.cn

southeastern regions of the study area, but it was weak in the central and southwestern regions of the study area. This study provides a new perspective on research of the ecological function theory of cultivated land, and a reference and support for regulating water resources effectively and formulating ecological compensation of cultivated land.

Key Words: water conservation function; dualistic water cycle; cultivated land; Huang-Huai-Hai Plain

水源涵养是生态系统重要生态服务类型之一^[1-2]。随着全球水资源短缺、水环境恶化以及水土流失问题加剧,生态系统的水源涵养功能越来越引起公众关注^[3-5]。耕地虽然是经过人工驯化,与人类关系密切的半自然生态系统,但它同森林、草地、湿地一样具有截留蓄水的生态服务功能。量化耕地水源涵养功能,不仅可以一定程度上缓解水资源短缺,实现农田生态系统水资源有效调控,还可以充分利用耕地生态系统的蓄水节流功能,促进耕地生态系统的可持续发展^[5]。

目前,耕地或者农田水源涵养功能相关研究^[6-8],多是在生态系统服务功能或服务价值评价研究中,将耕地水源涵养功能作为众多服务功能中的一项展开,直接进行耕地水源涵养功能的研究比较少见。而在生态系统服务框架下的耕地水源涵养功能研究,大多仅限于套用公式进行简单计算,对诸如不同尺度下耕地水源涵养功能内涵是否一致?是否存在与耕地水文调节服务的概念混淆?耕地水源涵养功能计量评价方法是否合理有效性?等问题缺乏深层次探讨,致使评估结果的科学性和有效性受到质疑^[9]。

水源涵养是用来对陆地生态系统某些水文过程或功能进行综合概括的一个概念,虽然不同学者对水源涵养功能内涵提出了不同的看法,但都把拦蓄降水能力作为衡量水源涵养功能的量化指标^[10-12]。本文借鉴吕一河^[9]对生态系统水源涵养内涵的界定,提出耕地利用视角下的耕地水源涵养功能内涵,指耕地系统在一定的时空范围和条件下,将降水保持在系统内的过程和能力,其水源涵养能力大小用系统水源涵养量进行衡量。耕地水源涵养量常用估算方法有土壤蓄水能力法、降水储量法、综合蓄水能力法和水量平衡法。各种方法各有优缺点,总体来看,前3种方法的原理和计算均较简单,可操作性强,在耕地水源涵养功能研究中使用频率较高,但通过土壤蓄水能力法和综合蓄水能力法估算出的结果,实为静止状态下耕地土壤的最大蓄水量和理论上的系统最大蓄水量,而降水储量法比较适合小尺度水源涵养量估算,尺度过大会因估算参数(多年平均产流降雨量、与裸地比农田减少径流的效益系数)的过度空间概化使结果不可信^[13-14]。水量平衡法将陆地生态系统视为一个“黑箱”,忽视系统复杂中间过程,以系统水量输入和输出的差值进行水源涵养量估算,系统水循环过程以及水源涵养机理明确,虽然计算过程较为复杂,但估算结果为系统实际水源涵养量^[14]。

本文通过简单探讨耕地水源涵养功能内涵,对比分析各种评价方法的优缺点,提出从耕地利用角度出发,基于二元水循环理论进行区域尺度耕地水源涵养功能研究,以期对耕地生态功能理论研究、耕地水源有效调控以及耕地生态补偿制定提供参考和支撑。

1 耕地水源涵养功能研究框架

1.1 耕地利用系统水循环

二元水循环是对“自然-人工”二元驱动力作用下水循环系统的抽象概括^[15-16]。随着人类对自然改造能力的不断增强,人类活动已经渗透并干扰到自然水循环的大气、地表、土壤以及地下各个过程,使现代环境下的水循环呈现明显的“自然-人工”二元特性^[15,17]。黄淮海平原是我国典型的大规模灌溉型农业生产区,在自然和人工二元驱动下,耕地形成了独特的二元水循环系统。人工驱动力通过引、提水工程克服水的重力,干预系统自然水循环,同时也形成二元驱动力下自然水循环和人工水循环双路径^[18]。

黄淮海平原耕地利用系统水循环过程如图1所示,分为自然水循环路径和人工水循环路径。自然水循环路径中,大气降水进入系统一部分被农作物冠层截留,继而蒸发;一部分通过茎流或形成穿透降雨进入土壤,渗入土壤中的水分,在满足土壤持水量需要后,将形成壤中流或地下水径流流出系统,而被土壤保持的那部分

水分随时间尺度的展开,也将消耗与土壤蒸发或植被蒸腾;还有一部分超过截留、下渗的降雨则形成地面径流流出系统。黄淮海平原灌溉方式主要包括引水灌溉和提水灌溉,其人工水循环路径中参与系统水循环的灌溉水,一部分来自系统外,一部分来自系统内,而整个系统人工水循环过程除了不存在冠层截留、冠层蒸发外,其他均与自然水循环路径相同。理论上,黄淮海平原耕地水循环具有二元性、可以明确区分出两条水循环路径,但实际水资源利用中,水分进入系统后的入渗、植被吸收利用、蒸散等过程往往存在时间滞后性,耕地系统的人工水循环与自然水循环二者总是相互交织存在。

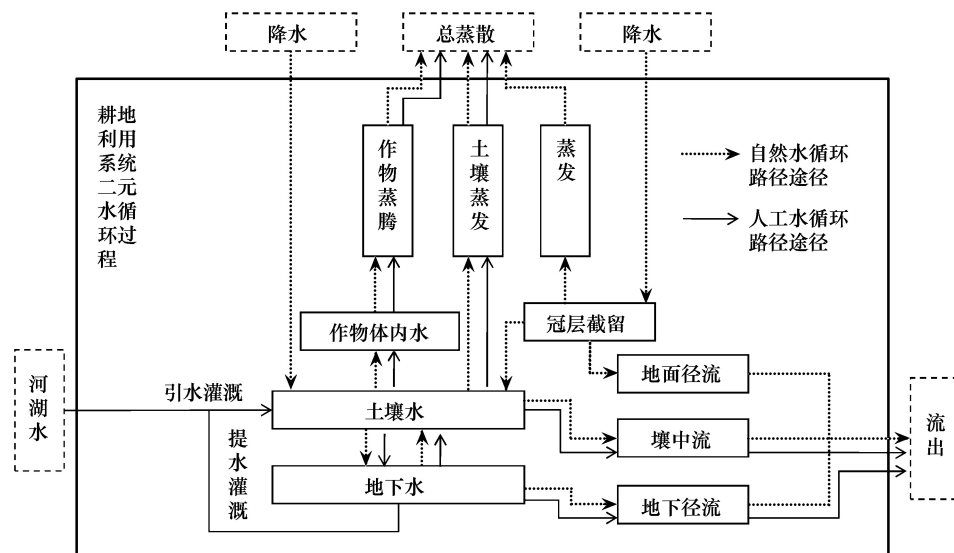


图1 黄淮海平原耕地利用系统二元水循环过程

Fig.1 Dualistic water cycle process of cultivated land use system in Huang-Huai-Hai Plain

根据水量平衡原理及系统二元水循环过程,黄淮海平原耕地利用系统水量平衡公式如下。需要说明的是,提水灌溉所用地下水来自系统内,同时这部分灌溉水也参与人工水循环路径,在单独人工水循环路径分析中有必要将其作为输入进行考虑,因此在不影响耕地水源涵养量计算和分析的情况下,本着简化表述、突出路径的原则,将这部分灌溉水在公式(1)~(10)中视作是系统外引水。

$$P + I = ET + R + \Delta W \quad (1)$$

$$ET = E_c + E_s + T \quad (2)$$

$$R = R_a + R_b + R_c \quad (3)$$

式中, P 为大气降水量(mm); I 为灌溉水量(mm); ET 为蒸散发量(mm); R 为径流量(mm); ΔW 为系统贮水变化量(含土壤和地下水两方面)(mm); E_c 、 E_s 、 T 分别为冠层蒸发、棵间土壤蒸发和植被蒸腾(mm); R_a 、 R_b 、 R_c 分别为地面径流、壤中流及地下径流量(mm)。

按照自然水循环和人工水循环两个路径进行系统水量平衡拆分,则自然水循环支路下的系统水量平衡为:

$$P = ET_n + R_n + \Delta W_n \quad (4)$$

$$ET_n = E_{nc} + E_{ns} + T_n \quad (5)$$

$$R_n = R_{na} + R_{nb} + R_{nc} \quad (6)$$

$$P = E_{nc} + E_{ns} + T_n + R_{na} + R_{nb} + R_{nc} + \Delta W_n \quad (7)$$

式中, P 为大气降水量(mm); ET_n 为降水引起的蒸散发量(mm); R_n 为降水引起的径流量(mm); ΔW_n 为降水带来的系统贮水变化量(mm); E_{nc} 、 E_{ns} 、 T_n 分别为降水引起的截留冠层蒸发、棵间土壤蒸发和植被蒸腾(mm); R_{na} 、 R_{nb} 、 R_{nc} 分别为降水引起的地面径流、壤中流及地下径流量(mm)。

由于黄淮海平原农业灌溉模式主要是漫灌,喷灌和滴灌范围较小,因此可以忽略冠层截留水蒸发,则人工

水循环支路下的系统水量平衡为:

$$I = ETm + Rm + \Delta Wm \quad (8)$$

$$ETm = Ems + Tm \quad (9)$$

$$Rm = Rma + Rmb + Rmc \quad (10)$$

式中, I 为灌溉水量 (mm); ETm 为灌溉引起的蒸散发量 (mm); Rm 为灌溉引起的径流量 (mm); ΔWm 为灌溉带来的系统贮水变化量 (mm); Ems 、 Tm 分别为灌溉引起的棵间土壤蒸发和植被蒸腾 (mm); Rma 、 Rmb 、 Rmc 分别为灌溉引起的地面径流、壤中流及地下径流量 (mm)。

1.2 基于系统水循环的耕地水源涵养功能阐述

黄淮海平原耕地水源涵养功能反映的是耕地在利用过程中对降水的保持能力。不同时空尺度和降水条件下耕地水源涵养过程不同, 因而其水源涵养功能表现也存在差异。空间尺度上, 耕地水源涵养功能与水文通量 (如降水、蒸散发、径流等) 和水文要素 (如地形地貌、土壤类型、植被类型、植被条件、不同层次前期储水特征) 关系密切, 具有典型的时空异质性^[10,12]。因此, 试验区尺度上进行的相关研究往往只代表局地, 所获取的相关参数难以直接用于大尺度。时间尺度上, 在单次降水事件中, 由于时间短, 蒸散发较小, 耕地水源涵养量根据是否产生径流可分为两种情况, 若某次降水事件中产生径流, 耕地水源涵养量等于降水量减去径流量, 若某次降水事件中未产生径流, 则耕地水源涵养量等于降水量; 月、季或者年等长时间尺度上, 由于耕地蒸散发会耗去大量截留水分, 耕地水源涵养量等于降雨量减去径流量和蒸散发量。但是从耕地利用的角度看, 作物蒸腾耗散的截留降水, 并非耕地涵养水量的无效耗费, 展现了耕地水源涵养能力, 起到节约水资源的作用, 也应计入耕地的水源涵养量中。

本文研究 1 年和区域尺度耕地水源涵养功能效应, 根据上述分析, 耕地水源涵养功能可以划分为 3 个层次, 即理想水源涵养能力、有效水源涵养能力和净水源涵养能力。理想水源涵养能力从单次降水事件角度出发衡量耕地的水源涵养功能, 即耕地的水源涵养量等于各降水事件水源涵养量直接相加之和。理想水源涵养能力代表了不考虑蒸散发状况下的区域最大水源涵养能力。有效水源涵养能力则是从耕地利用的角度出发, 来认识耕地的水源涵养功能, 用于作物蒸腾的那部分截留降水后期虽然被耗散, 但是该部分截留水得到了有效利用, 也应看作耕地的水源涵养能力。耕地有效水源涵养能力是在理想水源涵养能力的基础上进一步考虑了降雨截留后的冠层和土壤蒸发损失。净水源涵养能力反应的是耕地对降水的现实涵养能力, 以降水减去径流和蒸散发后的净降水贮存量衡量。分层来看耕地利用过程中的水源涵养能力不但有助于我们认识耕地利用系统净化水质、调节径流等功能, 对于解决水资源短缺、水环境恶化和水土流失问题也有积极作用。而认清研究区域的有效水源涵养能力和净水源涵养能力对于提升耕地生态效益、调控水资源和耕地生态补偿更有实际意义。

2 研究区概况和数据来源

2.1 研究区概况

黄淮海平原是由黄河、淮河、海河等河流冲积形成的平原, 在行政区划上主要涉及北京、天津、山东、河北、河南、安徽、江苏 5 省 2 市。黄淮海平原属暖温带季风大陆性气候区, 多年平均降水量在 500—900 mm, 且降雨主要集中在夏秋两季, 年日照时数 2300—2800 h, 无霜期 180—220 d, 光、热、水资源总体配置较好^[19]。本研究中的黄淮海平原是在区域地貌特征的基础上, 根据 2012 年底行政区划, 以市级行政区为基本研究单元汇总得到, 共含 40 个地市 (图 2)。

2.2 数据来源及处理

本研究所需数据主要包括土地利用覆盖数据、土壤质地数据、日降水数据、蒸散发数据、农田灌溉用水数据以及行政区划数据等。其中, 土地利用覆盖数据 (1:10 万) 和土壤质地空间分布数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 土地利用覆盖数据以 2010 年 Landsat TM/ETM 遥感影像为主

要数据源,通过人工目视解译生成,土壤质地数据根据 1:100 万土壤类型图和第二次土壤普查数据编制而成;日降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>) 的中国地面气候资料日值数据集(2011—2012 年),从全国 824 个观测站点中选取黄淮海平原及其周边 70 个站点(图 2),利用反距离加权法对 2011 年最后 5d 以及 2012 年全年日降水数据进行空间插值,生成共计 370 幅日降水栅格数据;蒸散发数据来自美国蒙大拿大学森林学院工作组 (<http://www.ntsg.umn.edu/project/mod16>) 生产的 MOD16 全球蒸散产品数据集(2012 年),根据 MOD16 产品数据轨道号的排列规律及本文研究区域所在地理位置,选择卫星轨道号为 h26v04、h26v05、h27v04、h27v05 和 h28v05 的 MOD16A2 2012 年月数据进行下载;农田灌溉水量来自河北、山东、河南、江苏、安徽省以及部分地市的水资源公报,对于无法直接获得农田灌溉水量数据地市,根据省级平均农田灌溉水量与农业灌溉水量关系,做农业灌溉水量向农田灌溉水量的转换;行政区划数据来自 2012 年全国土地变更调查数据成果库。由于数据来源不同,需要对其进行拼接、投影、格式转换、裁剪等,处理后数据坐标系为 D_WGS_1984,空间分辨率为 30" (约 1km)。

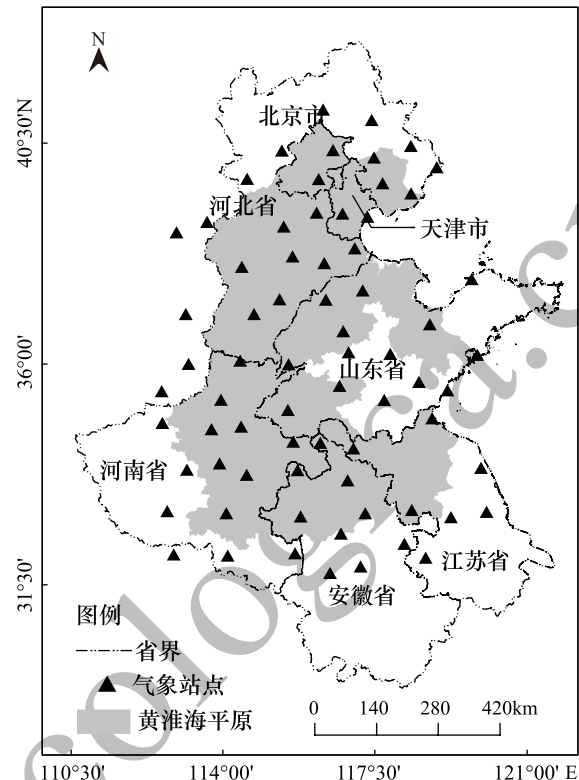


图 2 黄淮海平原区位概况图

Fig. 2 Sketch map of location and districts of Huang-Huai-Hai Plain

3 研究方法

3.1 SCS-CN 地表径流模型

SCS-CN 模型是美国农业部水土保持局(现更名为自然资源保护局, NRCS)根据美国不同地区降雨-径流资料,开发的一个估算无资料农业小流域径流量的经验模型^[20]。SCS-CN 模型具有结构简单易于理解、模型参数少、数据易于获取、能够反映出土壤类型、土地利用、地面条件和前期土壤条件等流域特性等特点。该模型一经美国官方发布,随即在世界各国的流域产流估算^[21-23]、流域洪峰预测^[24]、流域侵蚀产沙模拟^[25-26]、农田水资源管理^[27]、城市暴雨管理^[28]等领域得到广泛应用。

3.1.1 模型原理

SCS-CN 模型的建立基于水量平衡原理以及比例相等假设和产流前初损量与产流开始后最大潜在滞留量关系假设。SCS-CN 模型应用的关键是确定径流曲线 CN 值,整个计算流程如图 3 所示。CN 取值范围为[0, 100],CN 的确定需要考虑土地利用状况、水文土壤组(Hydrologic Soil Group, HSG)、前期湿润条件(Antecedent Moisture Condition, AMC)。

3.1.2 模型参数确定

(1)水文土壤组的确定:本文根据美国《National Engineering Handbook Hydrology Chapters》第七章水文土壤组分类标准^[30],对中国科学院资源环境科学数据中心提供的土壤质地数据,按照砂粒和粘粒百分比含量,进行了研究区水文土壤组类型 A(透水)、B(较透水)、C(较不透水)、D(接近不透水)划分。黄淮海平原耕地土壤主要为透水性较差的 C 类型,占比达到 89.52%。

(2)土地利用状况:本文研究对象仅为平原耕地,因此在综合考虑区域作物种植制度基础上,将土地利用

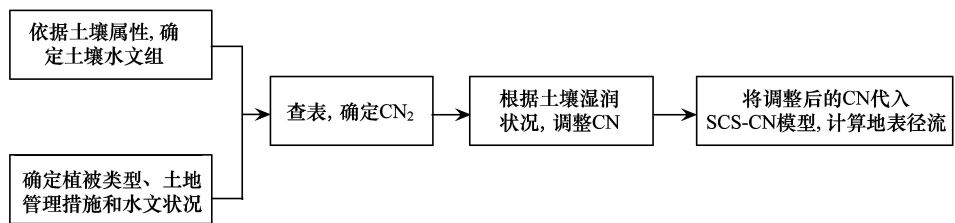


图3 SCS-CN 模型计算直接径流流程图^[29]

Fig.3 Flow chart of direct runoff calculation with SCS-CN model

覆被类型概化为:旱地-小麦/玉米和水田-小麦/水稻。土地管理措施主要为垄作和秸秆还田,水文状况良好。此外,由于本研究区范围较大,南北方向上农作物的生育期不完全同步,夏玉米从南向北存在一定程度的滞后,为简化计算,本文将1—5月及10—12月作为冬小麦生长季,6—9月作为夏玉米生长季。

(3)前期湿润条件:美国SCS引入了前期降水指数API(Antecedent Precipitation Index)来衡量前期土壤湿度对径流的影响。以前5天降雨量作为API,将AMC划分为干旱(AMC₁)、正常(AMC₂)和湿润(AMC₃)3级。本文在确定研究区土壤前期湿润条件时,仍采用此量化方法,且1月、2月、11月、12月为越冬季,3—10月为生长季。

(4)CN值的确定:在综合考虑研究区域的水文土壤组、土地利用状况后,确定AMC₂条件下的CN₂值如表1所示。其中稻谷季水田无论前期土壤湿润程度如何,CN值皆取98。AMC₁和AMC₃条件下不同土壤-覆被组合CN₁和CN₃值,可以通过与CN₂间的关系进行转化。

表1 AMC₂条件下研究区不同土壤-覆被组合CN₂值

Table 1 CN₂ values of different soil-cover in the study area under AMC₂ condition

植被类型 Vegetation types	水文土壤组 Hydrologic soil group			
	A	B	C	D
旱地-小麦 Dry land-Wheat	63	75	83	87
旱地-玉米 Dry land- Corn	67	78	85	89
水田-小麦 Paddy field-Wheat	63	75	83	87
水田-水稻 Paddy field-Rice	98	98	98	98

A(透水)、B(较透水)、C(较不透水)、D(接近不透水)

3.2 耕地水源涵养功能

根据1.2节对耕地各层次水源涵养功能的阐述,确定不同层次耕地水源涵养功能计算公式如下:

$$W_{n1} = P - Rn \quad (11)$$

$$W_{n2} = P - Rn - Enc - Ens \quad (12)$$

$$W_{n3} = P - Rn - ETn \quad (13)$$

式中, W_{n1} 、 W_{n2} 、 W_{n3} 分别为耕地理想水源涵养量、耕地有效水源涵养量和耕地净水源涵养量(mm); P 、 Rn 、 Enc 、 Ens 、 ETn 含义同上。

3.3 几个重要蒸散发数据处理

本文使用的MOD16 ET数据计算时分别考虑了冠层截留水分蒸发、土壤蒸发和植物蒸腾,其中冠层截留水分蒸发和土壤蒸发是系统在人工水补给情况下的总蒸发。而耕地有效水涵养量和净水涵养量计算时,需要获得冠层截留水蒸发、降水引起的棵间土壤蒸发和降水总蒸散发,这就需要对系统总ET进行分解。(1)农田实际灌溉水蒸散:随着全国高效节水灌溉农业的发展,黄淮海平原大水漫灌的传统灌溉方式已经基本不存在。因此,在假设本区域实际进入农田灌溉水不产生径流和地下水补给的条件下,这部分灌溉水将全部用于构成植株体、蒸散发消耗以及维持一定的田间持水量。由于组成农作物植株体的水分只占其总需水量很微小一部分,一般不超过1%,而这1%中来自灌溉水的部分会更小,同时维持田间持水量的这部分灌溉水,从年尺度上看,后期还会被利用、消耗并被雨水补充,实际进入农田灌溉水基本可视作全部用于蒸散发。基于此,本文根据植被研究区2012年40地市农田灌溉用水量及5省2市农田灌溉水有效利用系数,得出实际进入农田灌溉用水量,并以此为作为灌溉水蒸散发量得出不同地市平均 ETn 与 ET 的一个比例系数 η ,则 $ETn = \eta ET$ 。(2)作物蒸腾与棵间土壤蒸发:作物蒸发蒸腾是农田水分消耗的最主要形式,无论是传统的蒸渗仪法、波文比法、涡度相关仪法、还是现代遥感估算法^[31]多是进行土壤蒸发和植被蒸腾的集总估算,将二者分开估算的研

究较少。但根据王健^[32]、赵丽雯^[33]、陈博^[34]等研究可以看出作物蒸腾与蒸散之间存在一定的比例关系。本文假设降水产生的作物蒸腾与棵间土壤蒸发之间的比例关系与总蒸腾和总棵间土壤蒸发之间的比例关系一致,则 $T_n = \mu(ET_n - EN_c)$ 。 μ 的取值采用位于研究区域内及周边地区的王健^[32]和陈博^[34]关于夏玉米和冬小麦全生育期蒸腾占比的平均值。(3)冠层截留水蒸发:植被冠层截留受植被类型、植被特征、气候条件等多因素影响。本文冠层截留水蒸发量估算 $E_{nc} = \varphi \times P$, φ 为小麦、玉米全生育期的降水截留率,分别取值 1.48%、10.4%^[35-36]。

4 结果与分析

4.1 耕地利用系统主要水循环要素分析

2012 年黄淮海平原平均年降雨、产流和蒸散量分别为 652.8、124.7、475.2mm(表 2)。在区域整体平均水平上看,黄淮海平原年均降雨量大于年均产流和蒸散量,能够满足本区农作物生长对水分需求,无需从系统外引入灌溉水进行补充。水量平衡条件下,2012 年黄淮海平原耕地利用系统仍有水分盈余,但具体到不同农作物生长季,则表现出截然相反的结果。冬小麦季,黄淮海平原平均降雨、产流和蒸散量分别为 164、2.2、203.7mm,降雨量小于产流和蒸散量,降水无法满足本区农作物生长对水分的需求,需要人工灌溉水补充系统才能达到水量平衡;夏玉米季,黄淮海平原平均降雨、产流和蒸散量分别为 486.9、121、269.5mm,降雨量大于产流和蒸散量之和,水量平衡条件下,系统仍有水分盈余。

表 2 2012 年黄淮海平原耕地利用系统水循环要素情况

Table 2 Water cycle factors of cultivated land use system in Huang-Huai-Hai Plain in 2012

时间 Time	降雨量 Rainfall/mm		产流量 Runoff/mm		蒸散量 Evapotranspiration/mm		盈亏状况/mm Surplus-deficit status
	区间 Interval	平均值 Average value	区间 Interval	平均值 Average value	区间 Interval	平均值 Average value	平均值 Average value
全年 Whole year	361.3—1137.2	652.8	0—740.75	124.7	143.3—1070.6	475.2	52.9
冬小麦季 Winter wheat season	88.5—351.3	164	0—22.1	2.2	76.4—514	203.7	-41.9
夏玉米季 Summer corn season	229.2—915.6	486.9	0—739.3	121	50.8—617.5	269.5	96.4

由图 4 可以看出,2012 年黄淮海平原耕地利用系统主要水循环要素——降雨、产流及蒸散均表现出明显的空间分异性。黄淮海平原降雨量不足 400mm 的低值区域主要位于河南省平原区的西北部,以及河北、河南、山东 3 省的交界处,年降雨量超过 1000mm 的高值区域主要位于黄淮海平原的东北和东南部。黄淮海平原大部分地区年产流量不足 100mm,产流形成的主要时节为夏玉米生长季。由于产流的形成与降雨关系密切,因此黄淮海平原产流量的空间分布表现出与降雨量基本相同的趋势。2012 年黄淮海平原大部分地区年总蒸散量在 300—700mm 之间,总蒸散的低值区域主要位于河北省东部与天津交界处,高值区主要位于平原南部的苏北地区和皖北中部地区。

4.2 耕地利用系统水量平衡

2012 年,通过降水和农田实际灌溉参与整个系统水循环的水量为 2612.32 亿 m^3 ,其中 95.8%来自系统外,农田灌溉使用地下水量 110.1 亿 m^3 ;系统总蒸散发量为 1701.25 亿 m^3 ,其中来自降水、系统外灌溉补充和地下水灌溉补充蒸散发量分别占 83.83%、9.7%、6.47%;系统径流总流出水量约 446.45 亿 m^3 。将耕地利用系统看作一个黑箱,从系统外总输入水量 2502.2 亿 m^3 ,系统总输出水量 2147.7 亿 m^3 。

自然水循环路径:2012 年,通过降水进入黄淮海平原耕地利用系统的水量为 2337.19 亿 m^3 ,其中 74.8%集中在夏玉米季,约 1748.09 亿 m^3 ;降水进入系统后随即以径流形式流出系统水量为 446.45 亿 m^3 ,占降水量的 19.1%;降水用于蒸散发消耗量约 1426.12 亿 m^3 ,其中,冠层截留蒸发降水 191.46 亿 m^3 ,棵间土壤蒸发降水 571.52 亿 m^3 ,植被蒸腾消耗降水 663.13 亿 m^3 。

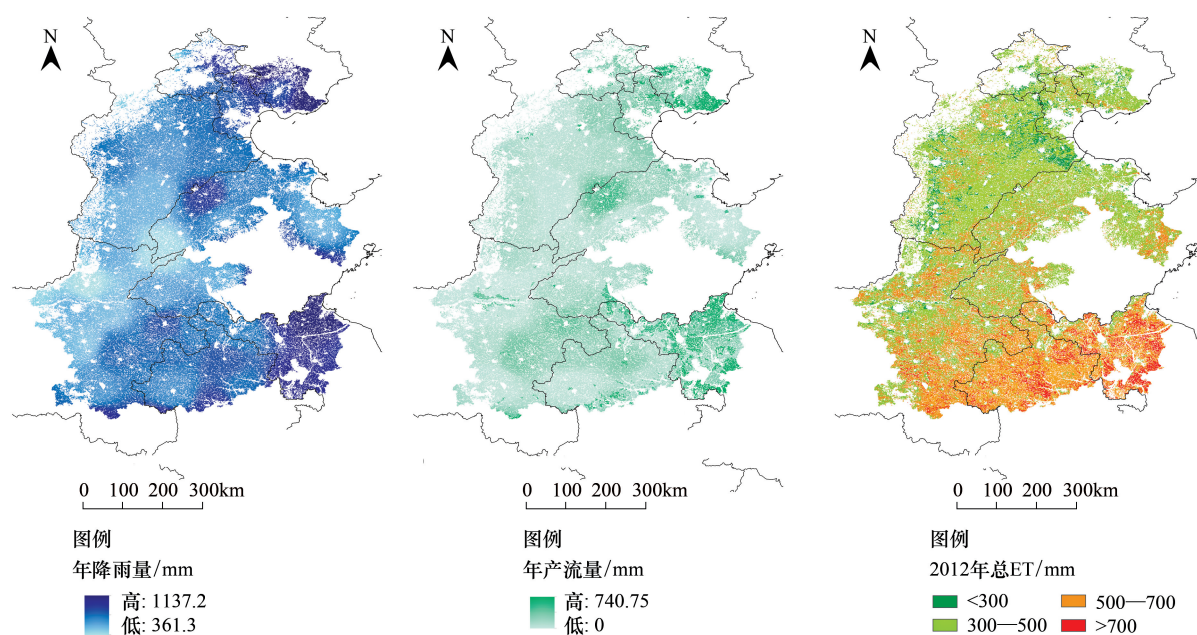


图4 2012年黄淮海平原耕地利用系统主要水循环要素空间分异

Fig.4 Spatial distribution of water cycle factors of cultivated land use system in Huang-Huai-Hai Plain in 2012

人工水循环路径:2012年,黄淮海平原进入农田实际灌溉水量为275.13亿 m^3 ,其中60%来自河湖水,为系统外人工灌溉补充,其余均为系统内地下水。系统引水和提水灌溉蒸散发量分别为165.03、110.1亿 m^3 。

4.3 耕地水源涵养功能分析

2012年黄淮海平原耕地理想水源涵养能力为1890.74亿 m^3 ,占年总降水量的80.9%,通过农作物截留和土壤持水,黄淮海平原的耕地利用系统保持了约4/5降水量。理想水源涵养能力仅反应了黄淮海平原耕地的最大水源涵养能力,耕地在实际利用过程中,上述涵养量中的农作物冠层截留水分,以及土壤中保存或渗漏补给地下水的部分水分,会通过蒸发和蒸腾作用耗散掉,其中冠层截留蒸发和土壤蒸发为无效蒸发,农作物蒸腾耗散的水分虽然最终离开了土壤载体,但是却得到了有效利用,减少了人工水分的补给,也应看做耕地利用系统的实际水源涵养量。因此,黄淮海平原耕地有效水源涵养能力为1127.76亿 m^3 。2012年黄淮海平原耕地净水源涵养能力仅为464.62亿 m^3 ,占理想水源涵养量的24.57%,耕地最大水源涵养能力中仅有约1/4的水分最终储存于土壤或补充地下水。

4.4 耕地水源涵养功能空间分异

由图5可以看出,2012年黄淮海平原大部分地区理想水源涵养能力在300—700mm,理想水源涵养能力不足300mm地区主要分布在河南省平原区的中部,以及山东和江苏两省交界处,理想水源涵养能力超过700mm地区主要分布在黄淮海平原东北部和东南部;2012年黄淮海平原有效水源涵养能力主要在200—400mm之间,平原北部和南部有效水源涵养能力相对较强,平原中部河北、山东、河南3省交界处以及河南省平原区西部有效水源涵养能力较弱,由于数据分解原因,在河南省平原区中部以及山东省平原区南部出现少量有效水源涵养能力小于0的区域,这与实际结果可能不符,但也可以说明2012年这些地区耕地有效水源涵养量很小;2012年黄淮海平原净水源涵养能力主要在100—300mm之间,平原东北部和东南部净水源涵养能力较大,超过300mm。同时,随着蒸散因素考虑的增多以及受数据分解影响,黄淮海平原净水源涵养能力表现为负的区域范围逐渐扩大,主要分布在平原南部。毋庸置疑这些地区耕地具有水源涵养功能,准确地说理想水源涵养能力,但由于耕地利用强度较大,耕地涵养水量不能满足区域农作物生产对水分的需求,耕地在发挥水源涵养功能同时更多的是表现为发挥涵养生态的功。

通过图4和图5比较可以看出,一般降水丰富地区,耕地理想水源涵养能力和有效水源涵养能力较大,二

者与地区降水趋势基本保持一致。但理想水源涵养能力较大的地区,其净水源涵养能力未必呈现相同趋势,比如平原北部京津冀地区与南部的皖北地区,理想水源涵养能力基本都在 500mm 以上,但由于平原南部蒸散发大于北部,导致皖北地区出现大量净水源涵养量负值区,其净水源涵养能力明显不及北部京津冀地区。可见,耕地水源涵养能力与区域的降水、径流和蒸散发情况直接相关,是作物、土壤以及农田管理措施共同作用产生的结果。

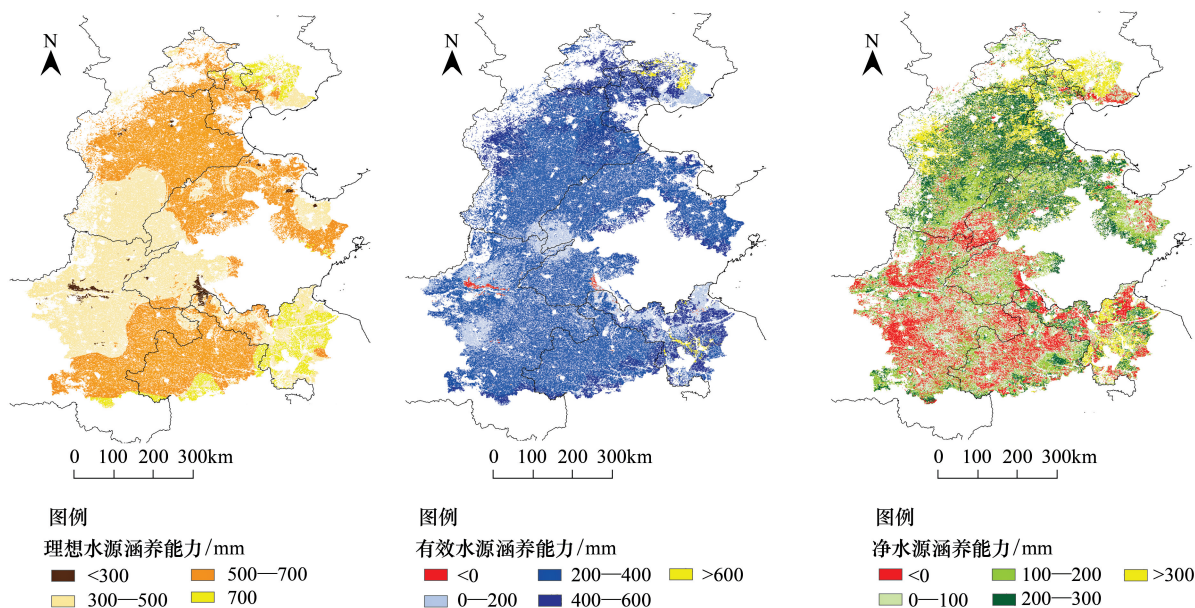


图 5 2012 年黄淮海平原耕地水源涵养功能空间分异

Fig.5 Spatial differentiation of the water conversion function of Cultivated land in Huang-Huai-Hai Plain in 2012

5 结论与讨论

(1)耕地是人工控制下的开放式自然生态系统,在自然和人工驱动力共同作用下,黄淮海平原耕地利用系统具有典型的二元水循环特性。本文从耕地利用系统的角度出发,基于整个系统水循环过程,以 1 年作为区域尺度耕地水源涵养功能研究的周期,通过分析黄淮海平原耕地水循环过程,提出耕地水源涵养功能具有层次性,可以划分为理想水源涵养能力、有效水源涵养能力和净水源涵养能力。其中,理想水源涵养能力是耕地的最大水源涵养量,属于传统意义上的理解,效水源涵养能力和净水源涵养能力才是对耕地水资源调控、耕地保护生态补偿有现实意义的功能。

(2)在自然和人工二元驱动下,黄淮海平原耕地利用系统水循环形成自然水循环和人工水循环两条路径。自然水循环路径中,通过降水进入系统水量为 2337.19 亿 m^3 ,降水蒸散发量为 1426.12 亿 m^3 ,降水产生径流 446.45 亿 m^3 ;人工水循环路径中,农田实际灌溉用水量为 275.13 亿 m^3 ,系统引水和提水灌溉蒸散发量分别为 165.03、110.1 亿 m^3 。虽然农田人工灌溉水补充对区域粮食生产,尤其是小麦生产有重要作用,但系统总水分盈余主要来自降水。

(3)通过分析计算,黄淮海平原耕地理想水源涵养能力、有效水源涵养能力和净水源涵养能力分别为 1890.74、1127.76 亿 m^3 和 464.62 亿 m^3 。作为一个整体,无论从哪个层面看,黄淮海平原耕地水源涵养功能效应均表现为正向性。但具体到区域内部,黄淮海平原耕地水源涵养功能则表现出明显空间分异性。北部和东南部地区耕地水源涵养能力较强,中部和西南部地区耕地水源涵养能力较弱。随着耕地水源涵养功能层次性的不断递进,研究区域内逐步出现不断扩大化的水源涵养量负值区,这些地区耕地在实际利用过程中,发挥水源涵养功能同时更多的是表现为发挥涵养生态的功效。耕地水源涵养能力是作物、土壤以及农田管理措施共

同作用产生的结果,与区域的降水、径流和蒸散发等情况直接相关。耕地理想水源涵养能力较大地区,其有效水源涵养能力也较大,但其净水源涵养能力未必保持与二者同等趋势。

(4) 基于水量平衡法的耕地水源涵养功能研究,不同于常见的森林^[37-38]或者山区流域尺度^[29]的生态系统水源涵养功能研究,耕地利用系统具有典型的二元水循环特性,自然降水和人工灌溉水交互贯穿于整个系统的水循环过程。如何将两条水循环路径区分开进行计算,目前没有准确、适用的方法。本文对人工水循环过程做了一些基本假设和简化,并尝试通过部分水循环要素分解,进行耕地水源涵养能力估算,其计算结果与实际情况之间还存在一定差异。如何准确提高区域尺度耕地水源涵养功能研究的准确性,还需要进行更加深入的探讨和研究。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, VanDen Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] 赖敏, 吴绍洪, 戴尔阜, 尹云鹤, 赵东升. 三江源区生态系统服务间接使用价值评估. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 38-50.
- [3] Miura S, Amacher M, Hofer T, San-Miguel-Ayanz J, Ernawati, Thackway R. Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 35-46.
- [4] Zhang B, Li WH, Xie GD, Xiao Y. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416-1426.
- [5] 李晶, 张微微. 关中——天水经济区农田生态系统涵养水源价值量时空变化. *华南农业大学学报*, 2014, 35(3): 52-57.
- [6] 何文清, 陈源泉, 高旺盛, 尹存宝. 农牧交错带风蚀沙化区农业生态系统服务功能的经济价值评估. *生态学杂志*, 2004, 23(3): 49-53.
- [7] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(4): 55-60.
- [8] 肖玉, 谢高地, 安凯, 刘春兰, 陈操操. 华北平原小麦-玉米农田生态系统服务评价. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 429-435.
- [9] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [10] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 盖力强. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究. *自然资源学报*, 2010, 25(4): 585-593.
- [11] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. *生态学报*, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [12] 白杨, 欧阳志云, 郑华, 徐卫华, 江波, 方瑜. 海河流域农田生态系统环境损益分析. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2938-2945.
- [13] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 529-534.
- [14] 张灿强, 李文华, 张彪, 杨艳刚, 董敦义, 潘春霞. 基于土壤动态蓄水的森林水源涵养能力计量及其空间差异. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 697-704.
- [15] 王浩, 王建华, 秦大庸, 贾仰文. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法. *水利学报*. 2006, 37(12): 1496-1502.
- [16] 赵利. 环境流二元特性及其表征研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [17] 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 王浩, 王建华, 李海红, 褚俊英, 陈根发. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架. *科学通报*, 2014, 59(4/5): 419-427.
- [18] 邵薇薇, 李海红, 韩松俊, 黄昊, 吕华芳. 海河流域农田水循环模式与水平衡要素. *水利水电科技进展*, 2013, (5): 15-20.
- [19] 杨瑞珍, 肖碧林, 陈印军, 卢布. 黄淮海平原农业气候资源高效利用背景及主要农作技术. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(9): 88-93.
- [20] Soil Conservation Service. *National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10*. Washington, D. C.: United State Department of Agriculture (USDA), 1985.
- [21] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. *生态学报*, 2001, 21(7): 1041-1049.
- [22] Shaded S, Almasri M. Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. *Water Science and Engineering*, 2010, 3(1): 1-13.
- [23] Ajmal M, Moon G W, Ahn J H, Kim T W. Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds. *Journal of Hydro-environment Research*, 2015, 9(4): 592-603.
- [24] Kousari M R, Malekinezhad H, Ahani H, Zarch M A A. Sensitivity analysis and impact quantification of the main factors affecting peak discharge in the SCS curve number method: An analysis of Iranian watersheds. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 66-74.
- [25] Mishra S K, Tyagi J V, Singh V P, Singh R. SCS-CN-based modeling of sediment yield. *Journal of Hydrology*, 2006, 324: 301-322.
- [26] 吕明权, 吴胜军, 温兆飞, 陈吉龙, 姜毅, 甘捷. 基于 SCS-CN 与 MUSLE 模型的三峡库区小流域侵蚀产沙模拟. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 860-867.
- [27] Jung J W, Yoon K S, Choi D H, Lim S S, Choi W J, Choi S M, Lim B J. Water management practices and SCS curve numbers of paddy fields

- equipped with surface drainage pipes. *Agricultural Water Management*, 2012, 110: 78-83.
- [28] Sample D J, Heaney J P, Wright L T, Koustas R. Geographic information systems, decision support systems, and urban stormwater management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 127(3): 155-161.
- [29] 李润奎, 朱阿兴, 陈腊娇, 刘军志, 宋现锋, 林耀明. SCS-CN 模型中土壤参数的作用机制研究. *自然资源学报*, 2013, 28(10): 1778-1787.
- [30] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Natural Employee Development Center. Hydrology Training Series Module 205 SCS Runoff Equation[2016-05-30]. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/home/?cid=stelprdb1044570>.
- [31] 武夏宁, 胡铁松, 王修贵, 江燕, 李修树. 区域蒸发估算测定方法综述. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 257-262.
- [32] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 陈凤. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 17-22.
- [33] 赵丽雯, 吉喜斌. 基于 FAO-56 双作物系数法估算农田作物蒸腾和土壤蒸发研究——以西北干旱区黑河流域中游绿洲农田为例. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 4016-4026.
- [34] 陈博, 欧阳竹, 程维新, 刘丽平. 近 50a 华北平原冬小麦-夏玉米耗水规律研究. *自然资源学报*, 2012, 27(7): 1186-1199.
- [35] 马波, 马璠, 李占斌, 吴发启. 模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 136-146.
- [36] 刘战东, 刘祖贵, 张寄阳, 宁东峰, 南纪琴, 秦安振, 牛犇, 张宵, 肖俊夫. 夏玉米降雨冠层截留过程及其模拟. *灌溉排水学报*, 2015, 34(7): 13-17.
- [37] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. *生态学报*, 2013, 33(3): 789-797.
- [38] 张宏锋, 袁素芬. 东江流域森林水源涵养功能空间格局评价. *生态学报*, 2016, 36(24): 8120-8127.
- [39] 朱泰峰. 华北山区土地利用/覆被变化及其水资源效应——以北京市门头沟区为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.