

平原区土壤水资源计算模型研究

董艳慧¹, 周维博^{1*}, 杨路华², 脱云飞³, 王艳宁⁴

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 河北农业大学城乡建设学院, 河北 保定 071001;

3. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 4. 湖北省水利水电勘测设计院北京分院, 北京 100055)

摘 要: 依据小尺度水文学原理, 提出了基于有效降水量的土壤水资源计算模型, 利用水量平衡原理计算土壤水资源量。利用河北省冉庄实验站的资料, 计算丰、枯水年的土壤水资源量分别为 642.68 mm 和 415.34 mm, 降水对土壤水资源的贡献率分别为 85% 和 76%, 凝结水对土壤水资源的贡献率分别为 15% 和 24%, 其计算结果与实际情况相符, 凝结水在土壤水资源中占重要地位, 在计算土壤水资源量时不可忽视。结果表明: 基于有效降水量的土壤水资源求解模型, 是计算小尺度水文学上土壤水资源量的另一种有效方法, 具有良好的适用性。

关键词: 土壤水资源; 有效降水量; 计算模型; 计算方法

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)06-0236-05

河北省水资源严重短缺, 全省水资源总量为 204.9 亿 m³, 多年平均降水量为 557.8 mm, 降水量时空分布不均, 全年降水量的 80% 集中在 6~9 月。人均水资源量为 307 m³, 仅为全国人均水平 2 200 m³ 的 1/7, 远低于国际公认的人均 1 700 m³ 的用水紧张线, 是受人口、生态双重压力的极度资源型缺水省份^[1,2]。农业用水占总用水量 70%, 解决农业用水问题是解决河北省用水矛盾的关键。据河北冉庄水资源实验站资料, 作物生长需水量的 70%~90% 由土壤水提供。在农业灌溉用水中, 各种水资源只有转化为土壤水, 才能供作物利用和消耗, 因此, 进行土壤水资源研究, 对水资源合理开发利用、农业生态系统中水量平衡, 以及指导农业节水灌溉有着特别重要的意义^[3,4]。

“土壤水资源”这一概念是由前苏联学者李沃维奇于 1974 年首次提出的。发展至今, 不同学者对其理解不同, 总体上可分为广义和狭义两种, 广义上的土壤水资源是指天然条件下储存在潜水面至地表面的包气带中且能经常得到循环的水量; 狭义上, 即从能被利用的角度考虑, 是指天然条件下根系作用范围内, 能经常得到循环更新的水量。平原区土壤水资源的补给项有降水、水气凝结、地下水(主要是潜水)补给。

对土壤水资源计算模型的研究, 国内外学者提出了一些具有代表性的模型, 主要为以下几类: (1) 应用水量平衡或水循环通量法进行计算, 将降水量

对土壤水的补给看作土壤水资源量^[5]; (2) 用土壤水动力学方法从微观角度进行计算, 应用土壤水动力学方法研究农田水分动态, 对土壤水分的运动和转化进行深入分析^[6]; (3) 用蒸散发量来计算土壤水资源, 把所有的土壤水分蒸发量全计为土壤水资源量^[7]。由于这些计算模型缺乏普适性, 且模型中各项的计算方法不统一, 导致土壤水资源的计算方法各异。

本文采用王浩等人^[8]研究中的土壤水资源的概念, 但是限定土壤水资源评价的深度范围为评价土层。在此基础上, 探讨土壤水资源的计算和评价方法。基于水量平衡原理, 在小尺度水文学基础上, 建立了以有效降水量、凝结水、潜水蒸发量及时段初有效的土壤水量为因子的平原区土壤水资源计算模型。

1 土壤水资源的计算模型

本文从小尺度水文学的土壤水循环角度, 依据水量平衡原理来确定土壤水资源的计算模型。土壤水循环过程如图 1 所示。通过土壤水资源的补给来源和时段初有效的土壤水量, 确定土壤水资源的数量, 即计算时段内的大气降水、凝结水和评价土层以下土体对评价土层的补给量与时段初有效的土壤水量的和为该时期的土壤水资源量。模型如下:

$$W = \sum_{i=1}^n P_{0i} + Q + N + W_0 \tag{1}$$

收稿日期: 2008-05-05

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E200500286)

作者简介: 董艳慧(1982—), 河北邢台人, 博士研究生, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: dyh1918@163.com。

* 通讯作者: 周维博, 男, 教授, 博导, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: zwbxyz823@163.com。

式中, W 为一年内的土壤水资源量(mm); P_{0i} 为日降水在土壤评价层中形成的蓄变量(有效降水量, mm); n 为年内出现有效降水的天数(d); Q 为一年内的评价土层以下的土壤水对评价土层的补给量(潜水蒸发量, mm); N 为年内的凝结水总量(mm); W_0 为评价时段初评价土层内的有效土壤水量(mm)。

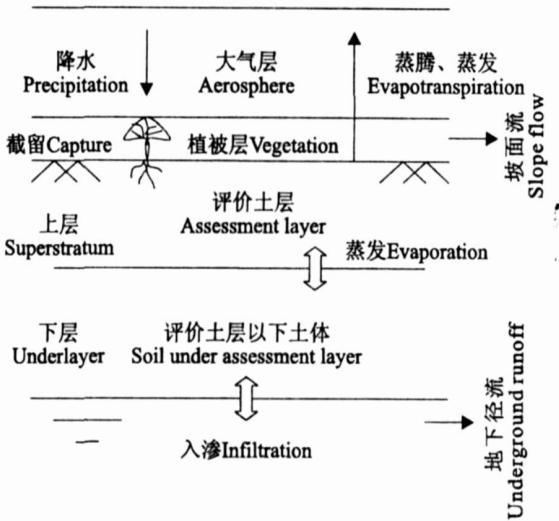


图 1 土壤水循环示意图
Fig.1 Sketch map of soil water cycle

式(1)右边各因子的确定方法如下:
(1) 评价土层中的日有效降水量 P_{0i}

$$P_{0i} = \begin{cases} \Delta, & P - P_e - P_z - R_s \geq \Delta \\ P - P_e - P_z - R_s, & P - P_e - P_z - R_s < \Delta \\ 0, & P \leq P_e + P_z + R_s \end{cases} \quad (2)$$

式中, P 为日降水量(mm); P_e 为日雨期蒸发量(mm); P_z 为日降水植物截留量(mm); R_s 为日地表径流量(mm); Δ 为日土壤可调节库容(mm), 不同土壤质地 Δ 取值不同, $\Delta = H \cdot (\theta_f - \theta_0)$; H 为评价土层厚度(mm); θ_f 为田间持水率; θ_0 为降水前评价土层的平均土壤含水率, 可通过实测确定, 或者通过蒸腾蒸发量及降水补给量进行推算。评价土层指

根系层及其下部一定范围内的补给层。其计算方法为: 根据不同生育期作物根系的深度, 将其按日期加权平均得全生育期作物根系深, 此值与影响土层厚度的和, 即本文所指的评价土层厚度。

径流量 R_s 的计算:

$$R_s = \begin{cases} (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) & P > 0.2S \\ 0 & P \leq 0.2S \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_s 为径流量(mm); P 为降水量(mm); S 为吸水参数, $S = 25400 / CN - 254$; CN 为径流曲线数, 与植被、土壤类别以及前期影响雨量等因素有关, 取值范围为 $0 \sim 100$ 。根据 SCS 土壤分类表选定土壤类别, CN 值查表(AMCII) 确定^[9]。此公式的应用需满足下述条件: 土地利用状况单一; 土壤相对均质; 降雨均匀; 耕作措施单一。本文的研究区域符合此条件, 故可采用此公式计算径流量。

植物截留量与降水强度和植物覆盖度有关, 由经验公式^[5] 表示如下

$$P_z = \begin{cases} 0.55 S_c I_r [0.52 - 0.0085(I_r - 5)] & I_r \leq 17 \text{ mm/d} \\ 1.85 S_c & I_r > 17 \text{ mm/d} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_z 为平均作物降水截留量(mm/d); S_c 为植被覆盖度; I_r 为雨强(mm/d)。

Richardson 等研究认为, 可用叶面积指数 LAI 描述作物覆盖状况

$$S_c = 1 - e^{-\alpha \cdot LAI} \quad (5)$$

式中, α 为系数, 与作物类型有关, 对小麦 α 为 0.428 ^[10]; LAI 为叶面积指数, 根据试验确定。

(2) 潜水蒸发量 Q

本文的研究区域位于海河平原, 采用刘昌明等人对黄淮海平原的研究成果^[11] 确定潜水蒸发量, 如式(6) 所示。

$$Q = (A - B \log H_0) t / \tau \quad (6)$$

式中, H_0 为地下水埋深(m); τ 为农作物(旱作) 生长期的天数(d), 小麦从拔节时期开始计算; t 为各生育期或计算时段的天数(d); A 与 B 为参数, 土壤性质与农作物种类不同, A 与 B 的取值也不同。

表 1 式(6)中 A 、 B 参数表(mm)^[11]
Table 1 Parameters A and B of the formula (6)

土壤性质 Type of soil	A (小麦) Wheat	B (小麦) Wheat	A (玉米) Corn	B (玉米) Corn	A (棉花) Cotton	B (棉花) Cotton
轻砂壤土 Light loam	80	210	49	162	100	251
轻粘壤土 Light clay loam	100	209	58	192	120	301
中质粘壤土 Medium clay loam	120	199	69	173	150	314
重质粘壤土 Heavy clay loam	150	249	86	180	200	419
粘土 Clay	200	332	115	211	300	551

- (3) 凝结水量 N
- 通过实测确定,若未进行大气凝结水的观测,则用相似地区的观测资料代替。
- (4) 时段初评价土层有效的土壤水量 W_0

$$W_0 = \int_0^l [\theta_0(z) - \theta_w(z)]dz \quad (7)$$

式中, l 为评价土层的深度(mm); $\theta_0(z)$ 为时段初评价土层含水率分布函数; $\theta_w(z)$ 为评价土层凋萎系数分布函数。

2 计算实例

采用冉庄水资源实验站的数据进行计算。该地处于温带大陆性季风气候区,属半湿润气候。夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。多年平均降水量 486.1 mm,包气带岩性以亚砂土为主。作物多为小麦、玉米。取 1981 年枯水年和 1991 年丰水年计算,计算起始时段取为 1 月 1 日。

据测定,河北黑龙港地区 2 m 以下土壤水常年向下运动^[12]。本研究区地理、气象条件接近黑龙港地区,并根据作物根系层及其活动层的范围确定评价土层的厚度为 2 m。即将包气带分为上、下两层,上层为 2 m 厚的评价土层,即计算对象层;下层为 2 m 以下至潜水面之间的土层。评价土层内平均的田间持水率为 0.3596,凋萎含水率为 0.094。据经验,将小于 5 mm 的降雨量看作雨期蒸发量。

根据参考作物潜在腾发量与 E601 蒸发皿蒸发量的换算关系和作物系数推算作物的实际蒸发量,进而推算土壤含水量的变化。从而日土壤可调节库容 Δ 可知,则根据式(2)可计算评价土层中的日有效降水量。6 月,7 月,8 月,9 月夏玉米的作物系数分别为 0.5,0.6,0.96 和 1.76^[13]。计算得到的实际作物日蒸发量如表 2 所示。

CN 值查表(AMCII)取为 67,由式(3)计算枯、丰年径流量分别为 28.2 mm 和 78.2 mm。

由式(4)计算小麦—玉米生育期的截留量。小麦在上一年的 10 月 11 日播种,6 月 10 日收获;玉米 6 月 14 日播种,10 月 2 日收获,小麦生育期取为 243 d,玉米生育期为 111 d。玉米、小麦的叶面积指数由表 3、表 4 确定^[14]。

表 2 1991 年小麦不同生育期的实际日蒸发量
Table 2 Actual daily evaporation in different growing periods of wheat in 1991

时间(月—日) Time(M—d)	生育期 Growing period	蒸发量 Evaporation
10—11~10—31	播种 Sowing	1.14
11		0.7
12		0.2
1	返青 Reviving	0.276
2		0.46
03—01~03—26	起身 Uprising	0.97
03—27~04—21	起身~拔节	1.66
04—22~05—01	Uprising~jointing	2.56 *
	拔节~孕穗	2.77
05—02~05—10	Jointing~booting	3.55 *
	孕穗~抽穗	5.14
05—11~05—15	Booting~heading	6.19
	抽穗~开花	6.19
05—16~06—05	Heading~flowering	5.1
	开花~乳熟	7.4 *
06—06~06—10	Flowering~milky	7.4 *
	乳熟~成熟	2.7
	Milky~maturing	

注:带 * 号的为第二个月份期间的值。
Note:Figures with * mean the value in the second month.

表 3 夏玉米不同生育期的叶面积指数
Table 3 Leaf area in different growing stages of corn

生育期 Growing stage	拔节 Jointing	抽穗 Heading	开花 Flowering	灌浆 Filling
叶面积指数 Leaf area index	2.5	4.0	4.5	3.5

表 4 冬小麦不同生育期叶面积指数(1980~1981 年栾城)^[14]
Table 4 Leaf area in different growing stages of wheat (Luancheng County, 1980~1981)

生育期 Growing stage	返青 Riviving	起身 Uprising	拔节 Jointing	孕穗 Booting	抽穗 Heading	开花 Flowering	灌浆 Filling	乳熟 Milky
叶面积指数 Leaf area index	0.8	1.4	3.3	4.1	4.5	4.8	4.6	3.5

目前冉庄实验站未进行大气凝结水的观测,用山东禹城实验站 1981~1982 年大气凝结水的观测资料代替,大气凝结水量如表 5^[15]。

不同地下水埋深,潜水蒸发对评价土层含水量

的补给不同。在潜水埋深较大的地区,潜水蒸发主要维持评价土层以下的土壤含水率保持不变,从而也间接地补充了评价土层,使其土壤可调节库容减小。河北冉庄 1988~1996 年 18 a 平均地下水埋深

9.97 m, 潜水蒸发对评价土层的补给量很少, 可忽略不计, 计算时取为 0。

表 5 大气凝结水量 (mm)

Table 5 Condensation water

月份 Month	凝结水量 Condensation of water
1	15.9
2	9.4
3	8.3
4	4.4
5	2.3
6	1.5
7	9.6
8	8.7
9	8.4
10	6.0
11	13.4
12	11.6

时段初评价土层有效的土壤水量对于多年平均而言可以忽略不计, 计算时取为 0。故可得河北冉庄的土壤水资源量如表 6 所示。

枯水年和丰水年土壤水资源量分别为 415.34

mm 和 642.68 mm。其中, 丰水年小麦生育期降水和凝结水对土壤水资源的补给量为 235.7 mm, 玉米生育期的为 404.9 mm。枯水年小麦生育期降水和凝结水对土壤水资源的补给量为 103.7 mm, 玉米生育期的为 306.8 mm。

3 结 论

本文依据小尺度水文学建立了基于有效降水量的土壤水资源计算模型, 并计算了河北冉庄丰、枯水年的土壤水资源量, 结果与实际情况相符。本文土壤水资源的计算考虑到了土壤质地、土壤含水量、植物的种类、种植结构、生育阶段等影响因素, 符合实际的土壤水补给和消耗情况。故基于有效降水量的土壤水资源求解模型, 是计算小尺度水文学上土壤水资源量的一种有效的方法, 具有良好的适用性, 不受地域性的限制, 不同地域的土壤水资源量, 可以通过改变计算公式中的参数值求得。但由于大尺度范围内的土壤质地、植物的种类、种植结构等存在较大差异, 其土壤水资源量的计算, 尚需进行深入研究。

致谢: 本文水文数据来自冉庄实验站, 对李雪峰工程师表示感谢!

表 6 冉庄土壤水资源量(mm)
Table 6 Soil water resource of Ranzhuang

年份 Year	降水 Precipitation	雨期蒸发 Evaporation in rainfall	地表径流 Surface runoff	截留量 Interception	入渗补 给 2m 以下 Supply through infiltration	有效降水量 Effective precipitation	凝结水 Condensation of water	时段初有效 的土壤水量 Soil water content in early stage	潜水补 给量 Potential water supply	土壤水 资源量 Soil water resources
1981(枯) Short	374.0	10.3	28.15	19.7	0.00	315.84	99.5	0	0	415.34
1991(丰) Abundant	672.2	11.0	78.21	28.6	11.23	543.16	99.5	0	0	642.68

注: 凝结水量根据山东禹城水文实验站资料确定。
Note: The data of condensation water was from Shandong Yucheng hydrological experimental station.

参 考 文 献:

[1] 王 伟. 河北省水资源现状及对策研究[J]. 中国环境管理, 2004, (2): 61—62.

[2] 郑连生, 穆仲义, 马大明. 河北省缺水状况、问题及对策[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 44—62.

[3] 沈振荣. 水资源科学实验与研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.

[4] 周维博. 降雨入渗和蒸发条件下野外层状土壤水分运动的数值模拟[J]. 水利学报, 1991(9): 32—36.

[5] 孟春红. 土壤水资源评价的理论与方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.

[6] 许 迪, 蔡林根. 冬小麦—夏玉米种植模式下的农田水量平衡模拟及入渗补给规律分析[J]. 水利学报, 1997(12): 64—71.

[7] 夏自强, 李琼芳. 土壤水资源及其评价方法研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 535—540.

[8] 王 浩, 杨贵羽, 贾仰文, 等. 土壤水资源的内涵及评价指标体系[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 389—394.

[9] 叶守泽, 许静仪, 王 祥. 水文水利计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1994. 183—185.

[10] 申双和, 金 龙, 周 英, 等. 农田土壤水分实用模式初探[J]. 气象科学, 1996, 16(3): 240—248.

[11] 刘昌明, 孙仁华. 黄淮海平原农田水量平衡的计算[A]. 黄淮海平原治理和开发: 中国科学院“六五”黄淮海平原科技攻关文集第一集[C]. 北京: 科学出版社, 1985. 91—103.

[12] 靳孟贵, 张人权, 高云福, 等. 土壤水资源的特性及若干指标[J]. 地质科技情报, 1997, 16(2): 73—78.

[13] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995. 87—88.

[14] 董振国. 黄淮海平原农田叶面积变化特征及光能利用率[A]. 黄淮海平原治理和开发: 中国科学院“六五”黄淮海平原科技攻关文集第一集[C]. 北京: 科学出版社, 1985. 163—175.

[15] 许发奎, 崔元生. 土壤水资源分析计算[J]. 河北水利科技, 1994, 15(3): 10—13.

Calculating model of soil water resources in plain area

DONG Yan-hui¹, ZHOU Wei-bo¹, YANG Lu-hua², TUO Yun-fei³, WANG Yan-ning⁴

(1. College of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. College of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China;
3. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE at Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 4. Hubei Institute of Water Conservancy Hydroelectric Engineering Exploration & Design Beijing Branch, Beijing 100055, China)

Abstract: The assessment of soil water resources is important to the reasonable exploitation of water resources and the improvement of agricultural water-saving technique in semiarid area. Based on the small-scale hydrology theory and the effective rainfall, a new soil water resources calculating model was put forward, which calculated the soil water resources by water balance principle. According to the data of Ranzhuang experimental station, Hebei Province, calculation was made of the soil water resources' value of high flow year and low flow year with 642.68 mm and 415.34 mm respectively. The proportion of rainfall in soil water resources was 85% and 76% respectively, while the proportion of condensation water was 15% and 24% respectively. The result accorded with the fact. The proportion of condensation water was large and can not be ignored in calculating the quantity of soil water resources. The results show that the calculating model based on the effective rainfall is another valid method to calculate the quantity of soil water resources for small-scale hydrology and has better applicability.

Keywords: soil water resources; effective rainfall; calculating model; calculating method

惠农兴农 政务先行

中农兴业网团向各级党政机关涉农部门赠送网络发布平台

为了贯彻落实党的十七届三中全会精神,按照《2006—2020 年国家信息化发展战略》总体部署和农业部《全国农业和农村信息化建设总体框架(2007—2015)》要求,遵循“政府部门主导,社会力量参与,完善运行机制,实现多方共赢,服务亿万农民”的基本原则,中农兴业工程组委会现面向全国县级以上各级党政涉农部门,免费开放全方位的三农资讯信息网络发布平台(www.znxy.org.cn),为农村经济建设、政治建设、文化建设、社会建设和党的建设搭建一个传播交流信息和开展电子商务的社会公共网络资源。详情请致电 010—68026787 或登陆 www.znxy.org.cn 中农兴业网