

黄土丘陵区土壤水资源评价指标与分析

邬春龙^{1,3}, 穆兴民^{1,2}, 高鹏^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 在总结土壤水研究现状和对土壤水的资源特性认识的基础上, 重新定义了土壤水资源, 土壤水资源是指植物根系可吸收利用的范围, 其补给主要来源于大气降水, 即能被植物(包括农作物)及土壤微生物所利用并可以恢复和更新的土壤水的数量; 并阐述了土壤水资源的特征, 它具有对降水依赖性与相关性, 不易保存性或易耗散性, 不可开采性与就地利用性, 有效性和无效性, 可调控性的特征; 提出了土壤水资源的评价指标, 包括土壤水资源最大存储量、可利用量、无效水资源量和实际存储量; 根据评价指标初步计算了黄土丘陵区典型地区的土壤水资源。

关键词: 土壤水资源; 特性; 评价指标

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2007)06—0189—05

中图分类号: S152.7

Assessment Index and Its Computation of Soil Water Resource in the Loess Hilly Area

WU Chun-long^{1,2}, MU Xing-min^{1,2}, GAO Peng^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and
Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of

Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A review on the current situation of researches on soil water resource is presented. Based on the concept of characteristics, a new definition of soil water resource is suggested. It has been pointed out that the soil water resource are defined as the renewable amount of soil water resources, which can be directly utilized for plants including crops and soil microbes at the depth where plant roots can absorb soil water. The article also expounds the characteristics of soil water resource, such as dependence on precipitation, easy consumption, beyond exploitation, validity or unavailable usability on site, and possibility to be controlled. The index system established for assessment includes four indexes: maximal stock of soil water resource, available quantity of soil water resource, unavailable quantity of soil water resource, and the amount of actual storage. According to the assessment indexes, preliminary calculation for a typical area in the loess hilly area is performed.

Keywords: soil water resource; characteristic; assessment index

随着经济的迅速发展, 水资源供需矛盾加剧, 人们在解决水资源短缺问题时, 对水资源内涵进行了拓展, 从狭义的径流性水资源拓展为包括降水和土壤水在内的广义水资源^[1]。土壤水是联系地表水与地下水的纽带, 在水资源的形成、转化及消耗过程中有着

重要作用^[2]。在干旱或半干旱的黄土丘陵区, 降水几乎是黄土高原植被生长所需水分的惟一水源, 而深厚黄土积蓄了大部分降水资源^[3]。在我国的水资源评价中, 以地表水和地下水总量作为区域水资源总量, 但赋予黄土中的土壤水确实是黄土高原水资源的重

收稿日期: 2007-05-23

修回日期: 2007-08-30

资助项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05-03); 水土保持研究所前沿领域项目(SW05106)

作者简介: 邬春龙(1981—), 男(汉族), 内蒙古呼和浩特市人, 在读硕士, 研究方向为生态水文。E-mail: wuchunlong05@mails.gucas.ac.cn.

通讯作者: 穆兴民(1961—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 博士, 研究员, 从事生态水文研究。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn.

要组成部分,如何合理而有效地利用土壤水资源就成为保证农作物和林草植被生长需水,改善生态环境,保障作物高产与稳产,实现农林草业可持续发展的关键^[3]。因此,开展黄土丘陵区土壤水资源评价研究不仅可以深化和丰富水资源科学的内涵,促进对区域水资源的全面认识,还可为黄土高原典型地区植被建设提供重要的科学依据。

近年来,随着人们对土壤水资源的关注程度不断加深,出现了一系列评价指标,以及区域土壤水资源的评价结果。但由于土壤水资源及其影响因素关系的复杂性,关于土壤水资源概念、评价理论、评价内容、评价方法及指标尚无定论。

黄土丘陵区土壤水的研究具有明显的特殊性和代表性,但该区有关土壤水分的研究多是关于影响土壤水分的土壤因素(如土壤质地及容重)和土壤水分常数(如田间持水量、凋萎湿度、饱和持水量等)的研究,以及局地植物(林草及农作物)生长与土壤水分关系研究^[4],这些研究重点在于对某时刻的土壤水分状况的评价,是土壤水资源评价的基础,但还不是完全意义上的土壤水资源评价。为此,本文在土壤水资源的概念与特性分析的基础上,针对黄土丘陵区的特点,构建了土壤水资源评价若干指标,探讨土壤水资源的评价方法。

1 土壤水资源的概念及其特性

1.1 土壤水资源的概念

由前苏联地理水文学家 Lvovich, M. I 在 1980 年时提出了“土壤水资源”概念^[5]。但对土壤水资源概念的系统阐述则出现在我国的十几年间,其它国家关于土壤水资源概念,评价研究相对较少。近年来,随着我国学者对水资源研究地深入,他们从不同角度阐述了土壤水资源内涵及数量表征。刘昌明对土壤水资源的概念作了详细论述,提出了用有效降水量表示土壤水资源^[6]。夏自强以区域多年平均水量平衡方程为基础来确定可更新的土壤水资源量,认为区域多年平均陆面蒸发总量即为土壤水资源量^[7]。目前,绝大多数的研究者对土壤水资源的研究从农业角度出发,认为土壤水资源是指可被作物根系吸收利用的浅层土壤孔隙中的水^[8]。

土壤水作为一种自然资源已被普遍认同,然而关于土壤水资源的范畴及评价理论观点不一。作为资源应有明确的服务对象或使用对象,土壤水资源主要

服务于植被和生态系统,因此,土壤水资源是指在一定时间和空间范围内能被植物及土壤微生物所利用并可以恢复和更新的土壤水资源的数量。

1.2 土壤水的资源属性

从陆地水循环来讲,土壤水是地面与大气间水分交换的水源,是水分循环中最重要要素之一。从生态系统角度看,无论是大气降水,还是地下水,只有转换为土壤水才可以被植物直接吸收。黄土高原深厚的土壤有着强大存储和调节土壤水能力为植物提供了持续供水保障。土壤水是陆地水循环的重要组成环节,是一种可恢复的淡水资源并有着自然资源的特点和水量平衡的动态属性^[9]。

Budagovskii 等指出^[10-11],土壤水具有 2 个基本特征,是一种重要的自然资源,同时,作为一种资源应该具有数量评价,并提出了土壤水资源评价的基本思路。因此,土壤水具有水资源所共有的属性——循环再生性、可调控性、可利用性。由此可见,土壤水应和地表水、地下水一样同属于自然资源。

1.3 土壤水资源的基本特征

与地表及地下水资源一样,土壤水资源也具有循环性、可恢复性、有限性、时空分部不均匀性等特点,在黄土丘陵区,受气候、地形、土壤特性、微地貌、土地利用方式等的影响表现出以下特殊特性。

1.3.1 土壤水资源对降水的依赖性与相关性 降水是黄土丘陵区的基本水源,土壤水资源量的空间分布对当地降水量具有很强的依赖性。在黄土丘陵区,盐池、绥德、固原、延安、富县、永寿等地的年降雨量依次为 261.2, 341.7, 366.1, 405.7, 576.7, 605.6 mm。对黄土区坡耕地 5 m 土层土壤水分进行测定,盐池、绥德、固原、延安、富县、永寿土壤含水量依次为 99.26, 112.25, 124.32, 199.52, 175.51, 274.93 mm。表现出土壤水资源储量随降雨量的增计而增减的趋势(见表 1)。

1.3.2 不易保存性或易耗散性 黄土高原区的土质疏松,毛管孔隙发达,一般总孔隙度占到 50%~55%,因此,该区土壤本身具有极强的水分蒸发性能。黄土丘陵区以半干旱气候类型为主,气候具有较强的蒸发力,为土壤水资源的蒸发损失提供了基本动力要素。因此,尽管在雨季通过入渗的水分很快有可能被蒸发而回到大气中。室内研究表明,不论是紧沙土、沙壤土、中壤土还是重壤土在初始 3 昼夜蒸发极为强烈(见表 2)^[3]。

表 1 黄土区坡耕地水储水量分布

mm

土层深度/cm	盐池	绥德	固原	延安	富县	永寿
0—100	93.44	99.13	84.50	164.43	158.12	239.40
1—200	107.49	95.63	101.00	174.44	158.88	263.72
2—300	97.98	103.38	127.86	218.66	172.72	275.44
3—400	108.35	125.75	140.69	220.11	185.17	309.58
4—500	89.03	137.25	167.81	219.82	202.57	286.27
平均	99.26	112.25	124.32	199.52	175.51	274.93
年均降雨量	261.20	341.70	366.10	405.70	576.70	605.60

注:表中数据为 2001 年 5 月测定。

表 2 不同质地土壤 0—100 cm 土层不同历时累积蒸发强度

mm/d

土壤类型	蒸发历时/d						
	3	10	20	30	60	90	120
紧沙土	2.56	1.69	1.10	0.83	0.63	0.46	0.41
沙壤土	15.50	5.49	3.26	2.35	1.13	0.95	0.75
中壤土	10.20	4.23	2.42	1.65	1.02	0.77	0.71
重壤土	6.70	3.48	2.24	2.06	1.40	1.21	0.99

1.3.3 不可直接开采性与就地利用性 与地表水和地下水资源不同,土壤水资源大多处于悬着状态,土壤水的移动属于非饱和流。所以不可能像地下水那样可以被人类直接开采输运,一般只能被作物或植物就地吸收利用。深厚的黄土覆盖为雨水资源转化为土壤水创造了得天独厚的赋存条件,也为植物利用土壤水资源给予广阔的空间。黄土性土壤深厚而多孔,可形象地被称为“土壤水库”,其持水空隙可达 25%~30%,土壤水库的总库容相当于饱和持水量所容纳的水量。据测定,黄土高原 200 cm 土层的持水容量可达 551.1~847.4 m^[12]。

1.3.4 有效性和无效性 在总的土壤水资源中并非所有的土壤水分都可被利用,当土壤含水量降低至凋萎系数时,土壤对水分的吸力等于植物根吸力(植物根系的吸力约为 1.5 MPa),植物能吸收利用水分极少,此时土壤中的水分视为无效水。当土壤含水量超过田间持水量时,多余的水分由于重力作用而继续下渗,形成地下水或通过壤中流的形式而排泄。虽极易被植物吸收,但这部分水在土壤包气带中储存时间非常短,因而也被视为是无效的水分。

1.3.5 可调控性 土壤水资源不可开采但可通过人为措施调控其输入输出,增加有效补充,减少无效损失,并可在时空分布上加以调控,尽可能地使其在时空分布上与植物生长相一致。人为措施调控土壤水分有设置水平沟、鱼鳞坑、梯田等水土保持工程措施和设置地膜、秸秆、砂砾等人工界面等保护性耕作措

施。在植被对相似耗水特征的植被,因地形不同,土壤含水量差异显著,不同土地类型土壤剖面含水量高低次序为:二级台地>一级台地>梯田>山顶>荒坡^[13],可见水土保持工程措施是人类通过改变微地形来调控土壤水资源的有效途径之一。不同覆盖条件对土壤水蒸发影响的比较试验表明^[14],休闲期秸秆覆盖可控制土壤水资源蒸发损失的 40%~50% 而在作物生长期可控制土壤蒸发的 30%左右;在休闲期和苗期地膜覆盖对土壤蒸发的控制达 80%~90%。与传统耕作方法相比,免耕和深松播后覆盖土壤水分的利用率可以提高 9.7%~46.8%和 12.3%~51.8%。

2 土壤水资源评价及其指标

与其它水资源评价一样,土壤水资源评价就是对一定空间和时间范围内土壤水资源之数量、质量、有效性、可利用量以及相应的时空分布等进行的定量分析^[8]。建立土壤水资源评价理论与方法,构建科学、实用的评价指标体系是土壤水资源评价的基础,是合理开发利用的依据。

2.1 土壤水资源评价的原则

2.1.1 科学性原则 土壤水资源评价指标既要立足于现有的基础和条件,能够科学、客观地反映不同地区、不同土地利用方式情况下资源状况;又要考虑不同地区的可比性,能反映土壤水资源的内涵和属性,采用通用的指标体系,有较强的可比性。

2.1.2 系统性与层次性原则 评价指标具有反映全面,层次分明,相对独立,所选取指标能够对土壤水资源特征和演变过程进行描述。由于土壤水资源具有水资源特性,鉴于以上原则考虑,围绕水资源有效性、可控性和可再生性特点建立土壤水资源评价指标分别为:土壤水资源最大存储量、土壤水资源实际存储量、无效水资源量、土壤水资源可利用量。

2.1.3 实用性与可操作性原则 在构建土壤水资源评价时,评价指标应既有利于进行实际指导,又简明易懂,既考虑技术条件使数据易于获得和更新,又便于分析、计算、评价和监测。

2.2 土壤水资源数量评价指标

土壤水资源的评价涉及内容甚多,同时也因篇幅限制,我们针对黄土丘陵区土壤水资源特点,以土壤水资源数量为核心,构建区域土壤水资源数量评价指标体系。

2.2.1 土壤水资源最大存储量 由于土壤含水率超过田间持水率会因重力作用而下渗,在土壤中停留时间较短,所以将土壤含水率达到田间持水率时植物利用深度上单位面积土壤柱体中所含有的水体积称为土壤水资源最大存储量。(用 W_G 表示,单位 mm),土壤水最大存储量在数值上等于土壤水达到田间持水量时土壤体积含水量分布函数 $\theta_f(z)$ 在植物可利用深度 H 上的积分。

$$W_G = \int_0^H \theta_f(z) dz \quad (1)$$

2.2.2 土壤水资源可利用量 土壤水资源可利用量分为理论可利用量和实际可利用量。为了评价土壤对水资源的调节能力,田间持水率 $\theta_f(z)$ 和凋萎系数 $\theta_{WP}(z)$ 之间的土壤水资源量称为理论可利用量,其计算式为:

$$W_{\max} = \int_0^H [\theta_f(z) - \theta_{WP}(z)] dz \quad (2)$$

式中: W_{\max} ——土壤水资源可利用量(mm)。

土壤水资源实际可利用量是为了度量土壤中某时刻存在的对作物有效的那部分水的多少,将某时刻作物可利用深度以上单位面积土壤柱体中存在的可能被作物根系吸收的那部分水量称为土壤水可利用量,记为 W_a ,以 mm 表示,它在数值上等于土壤水资源储存量与无效水资源量之差,计算式为:

$$W_a = \int_0^H [\theta_s(z) - \theta_{WP}(z)] dz \quad (3)$$

H 根据不同植被取值不同,农耕地与草地一般取 2 m,灌木和乔木取 5 m^[15]。

2.2.3 土壤无效水资源量 当土壤含水量达到凋萎含水量时,植物潜在利用深度上单位面积土壤柱体中

所含有的水体积称为土壤水无效水资源,记为 W_{wp} ,它在数值上等于根层土壤水达到凋萎含水量时的土壤体积含水量分布函数 $\theta_{WP}(z)$ 在作物潜在可利用深度 H 上的积分,以 mm 水深表示,即为

$$W_{WP} = \int_0^H \theta_{WP}(z) dz \quad (4)$$

2.2.4 土壤水资源实际存储量 植被可利用深度上单位面积土壤中所含水量称为土壤水资源实际存储量(用 W_s 表示,单位 mm),土壤水资源实际存储量在数值上等于土壤体积含水量分布函数 $\theta_s(z)$ 在植物可利用深度 H 上的积分。

$$W_s = \int_0^H \theta_s(z) dz \quad (5)$$

3 黄土丘陵区土壤水资源之数量评价

本研究对黄土丘陵区不同地区农田、灌木林、乔木林土壤水分进行了测定。计算不同类型各指标土壤水资源量,根据如下公式:

$$h = H\omega D$$

式中: h ——单位面积土壤水资源量(mm); H ——植物利用厚度(mm); D ——土壤容重(g/cm^3); ω ——土壤容重含水量(%)。根据土壤水资源定义,对农田和荒草地根系利用土壤水资源深度 H 取 2 m,对灌木和乔木根系利用土壤水资源深度 H 取 5 m,通过对黄土丘陵区蒲城县、澄县、宜川、安塞、靖边、吴旗、西峰地区土壤水分测定,并查阅各地区土壤容重资料^[3](表 3),根据上述指标分别计算出不同地区不同土地利用方式土壤水资源量。计算结果见表 4。

表 3 黄土丘陵区不同地区土壤物理特性

地点	土壤类型	田间持水量/ %	凋萎湿度/ %	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)
蒲城县	塬土	19.76	8.00	1.32
澄县	塬土	20.80	6.00	1.34
宜川县	黄锦土	20.10	6.25	1.26
安塞县	黄锦土	18.40	5.10	1.33
靖边县	风沙土	13.50	2.90	1.43
吴旗县	黄锦土	20.80	8.10	1.34
西峰市	黑垆土	23.10	7.30	1.26

4 结论

土壤水资源是黄土丘陵区水资源主要组成部分。本文针对黄土丘陵区的特点提出了土壤水资源概念,进一步分析了区域土壤水资源基本特征,特征包括土壤水资源对降水的依赖性与相关性、不易保存性或易耗散性、不可开采性与就地利用性、有效性和无效性

与可调控性;并初步构建了黄土丘陵区土壤水资源数量评价指标。根据指标体系计算了黄土丘陵区不同土壤及植被条件下土壤水资源最大存储量、可利用量、无效水资源量和实际存储量。在计算过程中发

现,土壤水资源评价体系需进一步完善;要实现流域土壤水资源的评价,需要将此评价体系与3S技术和流域分布式水循环模型相结合,实现尺度的转换。这将为规划区域的生态环境建设提供新的依据。

表4 黄土丘陵区不同地区土壤水资源量评价结果

mm

地点	土地利用	最大存储量	理论可用量	实际可用量	无效水资源量	实际存储量
蒲城县	农田	521.66	310.46	35.90	211.20	247.10
澄县	农田	557.44	396.64	48.78	160.80	209.58
	苹果园	1 393.60	991.60	200.33	402.00	602.33
宜川县	农田	506.52	349.02	134.82	157.50	292.32
	荒草地	506.52	349.02	19.91	157.50	177.41
	刺槐林	1266.30	872.55	114.66	393.75	508.41
	人工油松	1266.30	872.55	131.04	393.75	524.79
安塞县	农田	489.44	353.78	129.54	135.66	265.20
	荒草地	489.44	353.78	91.24	135.66	226.90
	人工柠条林	1 223.60	884.45	27.93	339.15	367.08
	刺槐林	1 223.60	884.45	40.57	339.15	379.72
靖边县	农田	386.10	303.16	228.80	82.94	311.74
	荒草地	386.1	303.16	103.82	82.94	186.76
	人工柠条	965.25	757.90	388.25	207.35	595.60
	杨树林	965.25	757.90	274.56	207.35	481.91
	刺槐林	965.25	757.90	290.29	207.35	497.64
吴旗县	荒草地	557.44	340.36	3.48	217.08	220.56
	小叶杨林	1 393.60	850.90	50.92	542.70	593.62
西峰市	农田	582.12	398.16	47.38	183.96	231.34
	荒地	582.12	398.16	244.19	183.96	428.15
	刺槐林	1455.30	995.40	472.50	459.90	932.40

[参 考 文 献]

- [1] 裴源生,赵勇,等. 广义水资源合理配置研究(I)[J]. 水利学报,2007,38(1): 1—7.
- [2] 雷志栋,胡和平,等. 土壤水研究进展与评述[J]. 水利学报,1999,10(3):311—318.
- [3] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社,2000:186.
- [4] 穆兴民. 试论黄土区旱地土壤水资源的地带性与非地带性[J]. 土壤学报,1999,36(2): 237—244.
- [5] Lvovich M I. Soil trend in hydrology[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1980,25(1): 33—45
- [6] 刘昌明. 水文水资源研究理论与实践:刘昌明文选[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [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,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] 布达果夫斯基亚. 土壤水资源和植被的水分保证[J]. 水问题论坛,2003,(3):61—66.
- [10] Budagovskii A I. Soil water resources and available water supply of vegetation Cover[J]. Water Resources, 1985,12(4):317—325.
- [11] Budagovskii, A I, Busarova O E. Basis of methods to evaluate changes in soil water resources and river runoff for different climate change scenarios[J]. Water Resources, 1991,18(2):111—120.
- [12] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报,2001,16(5):433—438.
- [13] 穆兴民,陈霁伟. 黄土高原水土保持措施对土壤水分的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4): 39—44.
- [14] 夏自强,李琼芳. 土壤水资源开发利用研究[J]. 河海大学学报,2001,29(6): 41—45.
- [15] 焦峰. 基于GIS的黄土丘陵区土壤水库蓄水数量特征及其生态供水潜力评价[D]. 陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2006.