

# 土壤水资源的特性及若干指标

靳孟贵

张人权 高云福 孙连发

(武汉水利电力大学水利工程系, 武汉, 430072)

(中国地质大学环境科学与工程学院, 武汉, 430074)

**摘 要** 在分析作物生长条件下土壤水均衡要素的基础上, 探讨了土壤水资源的概念, 深入分析了土壤水资源的特性(对降水的依赖性与相关性、不易保存性、不可开采性、就地利用性和可控性)。提出了土壤水理论无效库容、土壤水最大次调节量、土壤水可利用量等指标, 并初步探讨了河北王瞳试验场土壤水资源的特征。王瞳试验场土壤水理论无效库容为 355 mm, 土壤水最大次调节量为 314 mm; 土壤水储存量和土壤水可利用量随气象条件、灌溉以及作物状况不断变化; 据 1994 年和 1995 年资料计算, 土壤水可利用量一般为(210~ 380)mm, 土壤水储存量一般为(570~ 730)mm。

**关键词** 土壤水资源 特性 评价 调控

土壤水是四水转化的中枢。对农业而言, 它是可被作物直接利用的唯一形式。无论是灌溉水, 还是天然降水, 只有转化为土壤水后才被作物根系吸收<sup>[1]</sup>。据朱福星等<sup>[2]</sup>1984 年~ 1989 年间小区试验, 河北黑龙港地区全年降水的 75.9% 转化为土壤水, 9.2% 成为地表水, 14.9% 补给地下水。因此, 充分有效地利用土壤水是合理有效地利用水资源的关键环节。为此, 笔者在阐述土壤水资源概念的基础上, 结合河北王瞳试验资料, 讨论土壤水资源的特性, 并提出土壤水资源的若干指标, 为有效利用土壤水奠定理论基础。

## 1 土壤水资源的概念与特性

在不考虑侧向流动的情况下, 有作物条件下土壤水的收入、支出项可概化为图 1-A 所示。土壤水通过其上边界接受降水或灌溉, 当入渗水使土壤含水量超过田间持水量时, 便下渗补给地下水。当潜水位埋深较浅时, 土壤水与地下水的关系随潜水位波动和气象条件的变化而改变。随着潜水位埋深的加大, 土壤水获得地下水的补给越来越少。

当潜水位埋深增大到一定深度后, 地下水无法靠毛细力作用上升补给浅部土壤水。这时地下水只接受下渗补给, 不发生潜水蒸发的情况称为地下水位深埋<sup>[3]</sup>。例如, 在王瞳试验场, 地下水位埋深为(7.8~ 8.6)m (1994 年), 全年总水势垂向分布情况说明, 土壤水始终得不到地下水的补给(图 2)。此时, 土壤水收支要素如图 1-B 所示。土壤水的收入项为: 降水和灌溉入渗;

地矿部定向基金资助项目(直科定 93—02)成果

第一作者简介: 靳孟贵, 男, 1957 年 5 月生, 副教授, 现在武汉水利电力大学土木水力学学科博士后流动站从事研究工作

收稿日期: 1996-12-30

修改稿收到日期: 1997-01-09

编辑: 禹华珍

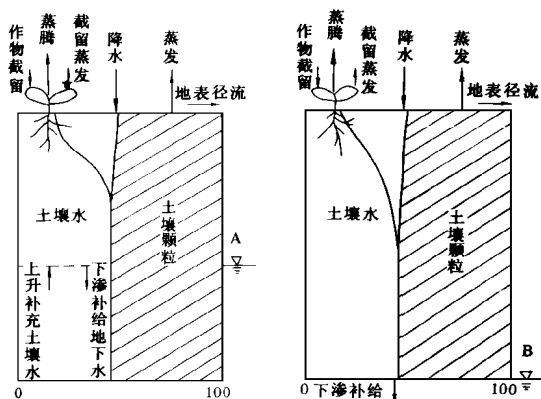


图1 无侧向流动时土壤水收入支出示意图

Fig. 1 Income and outcome of soil water under the non-horizontal flow condition

A 为潜水位浅埋条件; B 为潜水位深埋条件

下水相比不易保存,一方面表现在不及时利用或采取人为措施保存就会无效损失(蒸发消耗);另一方面表现在土壤含水量超过田间持水量后会发生深层渗漏补给地下水。因此,作物适时利用才能提高土壤水的利用效率。

(3) 不可开采性与就地利用性 土壤水资源不可能像地下水那样能被开采输运,一般只能被作物就地利用。

(4) 可调控性 土壤水资源可以通过人为措施(如人工改变微地貌,中期松土增加降水入渗,建立微水文系统,设置地膜、秸秆、砂砾等人工界面等)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作物一致。在这种情况下,不仅要在时空上调控土壤水以适应作物,而且还需要调整作物的时空布局以适应土壤水。

土壤水的一系列特性,尤其是它的可调控性,使我们在土壤水的有效利用方面有许多文章可做。

## 2 土壤水资源的若干指标

我们知道,在潜水位浅埋条件下土壤水的下边界条件受潜水位制约,如图 1-A 所示,其下边界有时表现为地下水上升补充土壤水,有时土壤水下渗补给地下水。而潜水位深埋(例如潜

支出项为:蒸腾、土面蒸发及下渗补给地下水,降水的一部分因作物叶面截留直接蒸发返回大气。

土壤水资源的概念是从农业的角度提出的,迄今为止尚未见到较为明确的土壤水资源概念。我们把可被作物根系吸收利用的地表浅层土壤层空隙中的水称为土壤水资源。气象条件、降水分布特征、包气带岩性及厚度、微地貌、土地利用方式与强度等都将影响土壤水资源的时空分布。土壤水资源具有以下特性。

(1) 对降水的依赖性与相关性 土壤水资源的时间分布对当地降水具有很强的依赖性,一般降水多的雨季土壤水储存量大,旱季土壤水储存量小。

(2) 不易保存性(易耗失性) 土壤水与地

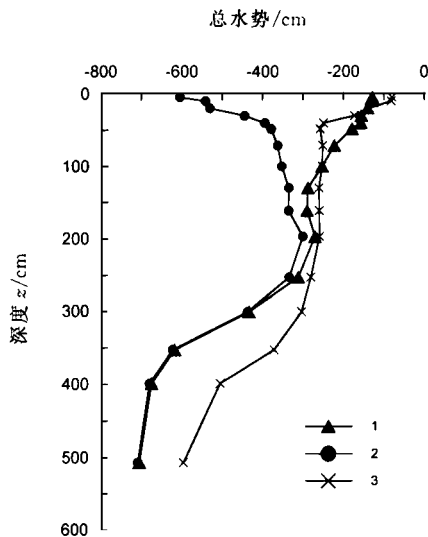


图2 1994 年王瞳 E4 田块土壤总水势垂向分布图

Fig. 2 Vertical distribution of total water potential of field E4, Wangtong in 1994

1, 2, 3 分别代表 5 月 10 日、5 月 25 日、7 月 29 日的总水势垂向变化曲线

水位埋深大于 6 m) 时, 土壤水下渗补给地下水, 无地下水反向补给土壤水(图 1-B)。笔者在潜水位深埋条件下提出以下指标, 用以刻画土壤水资源的特征, 指导土壤水的时空调控。

### 2.1 土壤水储存量(W)

某时刻作物潜在可利用深度以上, 单位面积土壤柱体所含有的土壤水体积称为土壤水储存量, 用以度量土壤水的多少, 反映土壤水系统所处的状态。记为  $W$ , 以 mm 水柱表示。它在数值上等于土壤体积含水量分布函数  $\theta(z, t)$  在作物潜在可利用深度  $d$  上的积分(图 3), 即

$$W(t) = \int_0^d \theta(z, t) dz \quad (1)$$

式中:  $W(t)$  为某  $t$  时刻的土壤水储存量;  $z$  为垂向坐标, 零点取在地面, 向下为正。

### 2.2 土壤水理论无效库容( $W_{wp}$ )

我们知道当根层土壤含水量达到凋萎含水量<sup>[4, 5]</sup>时或根层土壤水负压达到凋萎负压时, 土壤中的水不能被作物利用。此时, 作物潜在利用深度以上单位面积土壤柱体中所含的水体积称为土壤水理论无效库容, 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含水量分布函数  $\theta_{wp}(z)$  在作物潜在可利用深度  $d$  上的积分, 以 mm 水柱表示, 即

$$W_{wp} = \int_0^d \theta_{wp}(z) dz \quad (2)$$

显然, 土壤水理论无效库容是一临界值, 是土壤水调控时允许的下限土壤水储存量(图 4)。

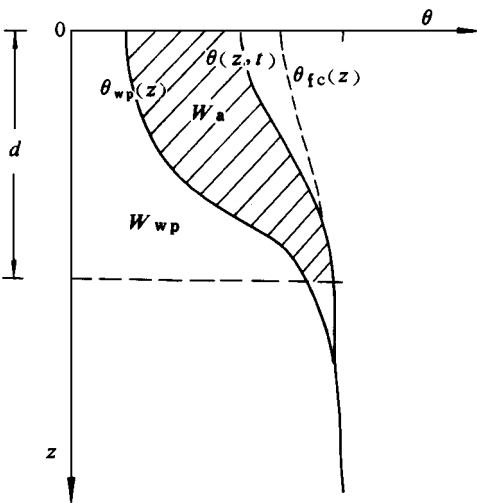


图 4 土壤水可利用量与土壤水无效库容

Fig 4 Usable amount and unusable reservoir of soil water

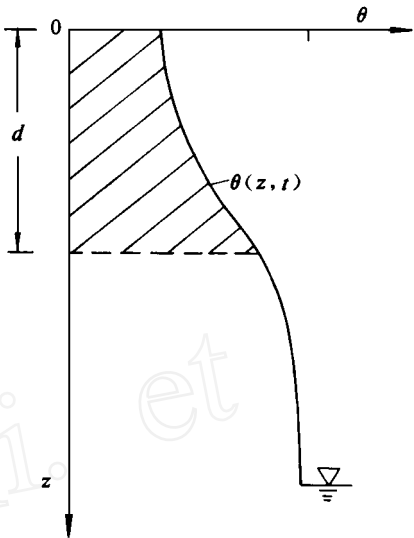


图 3 土壤水储存量的概念

Fig 3 Explanation for the concept of soil water storage

### 2.3 土壤水最大次调节量( $W_{max}$ )

为了评价土壤水系统的调节能力, 我们引出土壤水最大次调节量的概念。土壤水最大次调节量是指理论上限土壤水储存量与土壤水无效库容之差, 记为  $W_{max}$ 。理论上限土壤水储存量是指在不产生明显深层渗漏的条件下, 作物潜在可利用深度  $d$  以上单位面积土壤柱体所能容纳的最大水量, 即

$$W_{max} = \int_0^d [\theta_c(z) - \theta_{wp}(z)] dz \quad (3)$$

其中:  $\theta_c(z)$  为达到理论上限土壤水储存量时的土壤含水量分布函数。土壤水最大次调节量表征了土壤水最大可能的一次调节能力。因此, 土壤水最大次调节量可用以指导蓄水灌溉。显然, 当灌溉定额超过最大次调节量时, 将形成深层渗漏。

### 2.4 土壤水理论可利用量( $W_a$ )

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, 为土壤水调控计划提供依据, 我们提出土壤水理论可利用量的概念。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 水柱高度表示, 它在数值上等于土壤水储存量与土壤水理论无效库容之差, 如图 4 所示, 其表达式为

$$W_a = \int_0^d [\theta(z, t) - \theta_p(z)] dz \tag{4}$$

当土壤水储存量大于理论上限储存量时, 土壤水可利用量在数值上等于土壤水最大次调节量。因此, 根据特定条件下土壤水可利用量与作物阶段耗水量就可以制订一定时间内的田间灌溉计划。

以上 4 个概念都是以作物潜在利用深度为前提的, 而不同作物的可利用深度是不同的, 所以, 严格地讲, 这 4 个量的数值大小随作物种类及生长状况而变化。作物根系越深, 植株越大, 耐旱能力越强, 则土壤水理论可利用量和最大次调节量越大。例如, 后两个量对果树地就较一般粮食作物耕地要大。影响以上 4 个量数值大小的另一个重要因素就是土壤类型与结构。

以上概念均与作物潜在利用深度  $d$  有关。  $d$  可据野外土壤水势监测资料确定。如图 2 所示, 试验区大约以 2 m 为界, 2 m 以下土壤水常年向下运动。我们把 (0~ 2)m 的范围称为交替变动带, 2 m 以下的范围称为常年下渗带。因此,  $d$  就是交替变动带的深度, 也是最深零通量面的深度。  $d$  的大小主要受岩性结构、气象条件、作物种类等因素影响。据野外观测资料, 在计算王瞳地区土壤水资源时, 取作物潜在利用深度  $d = 2\text{ m}$ , 主要用于小麦、棉花以及类似作物。

### 3 王瞳试验场土壤水资源特征

通过对王瞳试验场 1994 年、1995 年试验田中较完整的 11 个竖井剖面的观测资料分析可以看出, 各试验田块土壤体积含水量的垂向分布均明显受岩性和深度的控制, 表现为粘土的含水量最高 (50% 左右), 泥质粉砂次之 (37% ~ 43%), 古土壤第三 (34% 左右), 表层亚砂土由于位于最上部, 加之根孔、虫孔十分发育, 其含水量一般低于粉砂 (图 5)。

土壤含水量的变化主要受气象条件、田间灌溉、作物种类及其生长情况等影响。降水或灌溉时, 表层含水量迅速增大, 负压降低。当降水或灌溉水量足够大, 使土壤水储存量超过理论最大值后, 随着降水或灌溉水的湿锋面下移, 深层土壤含水量逐渐增大, 并表现出一定的滞后。降水或灌溉之后, 土壤含水量因蒸腾和蒸发缓慢减小, 负压逐渐上升。土壤含水量的变化幅度由地表向下逐渐变小, 如 20 cm 处土壤含水量最低值接近 8%, 最大值可达 32% 以上, 变幅达 24%; 而 2 m 以下的土壤含水量变化很小, 一般小于 5%。

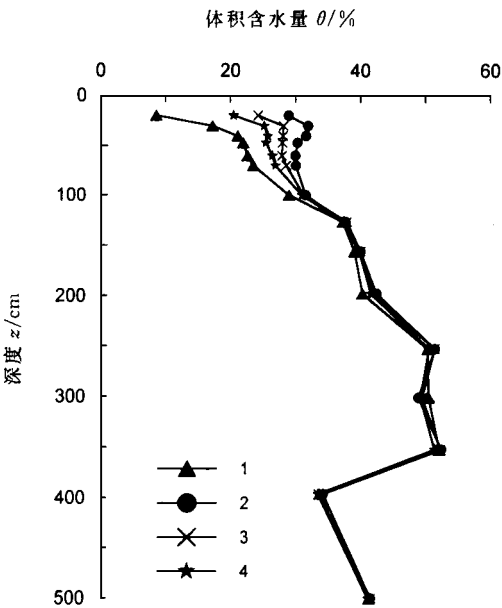


图 5 1993~ 1994 年麦 E<sub>4</sub> 田块土壤含水量随深度的变化

Fig 5 Soil water content versus depth for field E<sub>4</sub> in 1993-1994

1, 2, 3, 4 分别表示 4 月 17 日、4 月 19 日、4 月 25 日、4 月 30 日的含水量曲线

为了进一步讨论土壤水资源的特性,我们用一维非饱和流数值模拟模型,以王瞳 E<sub>4</sub> 和 J<sub>3</sub><sup>1</sup> 田块的资料计算土壤水无效库容和最大土壤水储量。计算土壤水无效库容时,先给定初始含水量,令降水和灌溉水量为零,使土壤水没有补充,只有消耗,模拟土壤水的减少过程,再计算根层表征点达到含水量或负压下限时的土壤水储量,就是所要求的无效库容。一般文献认为作物的凋萎负压大约在 10 000 cm 至 20 000 cm 之间,平均意义讲一般取 15 000 cm 作为土壤水的允许下限<sup>[6]</sup>。分析小麦、棉花等作物的根系分布情况可以发现,一般 90% 的根系发育在 60 cm 以上。因此,笔者从实用角度考虑,在计算时以根层中心部位 30 cm 处的负压等于 8 000 cm 作为允许下限。通过数值模拟计算得出王瞳试验场土壤水无效库容为 355 mm,对应的土壤含水量下限为:2.5 cm 处 9% (负压 11 000 cm),30 cm 处 14%。然而,农田灌溉学中一般认为,为了作物丰产不能使土壤负压达到凋萎负压,较理想的土壤负压下限为 (400~ 1 000) cm<sup>[6]</sup>。若取 30 cm 处的允许负压下限为 1 000 cm,计算得出此时的土壤水储量为 495 mm,对应的含水量下限为:2.5 cm 处 11.6% (负压 2 658 cm),30 cm 处 14%。

为了确定上限土壤水储量,我们于 4 月 18 日对 E<sub>4</sub> 田块灌溉 130 mm 水。通过计算发现,灌溉后有部分土壤水向深层入渗,至 4 月 22 日已不产生明显渗漏,我们把此时的土壤水储量作为研究条件下的上限土壤水储量。通过计算得出上限土壤水储量为 669 mm,此时 2.5 cm 处的负压为 232.6 cm,含水量为 26.6%;30 cm 处的负压为 177.4 cm,含水量为 29.2%。因此,从实用考虑,我们取 669 mm 作为试验区上限土壤水储量。

显然,试验区的土壤最大次调节量为 314 mm。这个数据告诉我们,土壤水的调节能力相当可观,使我们看到了在人工控制条件下本区实施雨养农业的可能性。

如表 1 所示,土壤水储量和可利用量的年内变化主要受降水和灌溉情况控制。一般雨季

表 1 王瞳试验场土壤水储量和可利用量季节变化

Table 1 Seasonal changes of storage and usable amount of soil water resource in Wangtong experimental station

(mm)

| 观测日期    | 1994 年               |          |          |                                  |          |           | 1995 年                   |          |         |
|---------|----------------------|----------|----------|----------------------------------|----------|-----------|--------------------------|----------|---------|
|         | 4 月 17 日             | 5 月 30 日 | 6 月 25 日 | 7 月 14 日                         | 9 月 30 日 | 10 月 25 日 | 5 月 30 日                 | 7 月 20 日 | 9 月 5 日 |
| 土壤水储量   | 571                  | 568      | 735      | 738                              | 574      | 624       | 567                      | 704      | 711     |
| 土壤水可利用量 | 216                  | 213      | 380      | 383                              | 219      | 269       | 212                      | 349      | 356     |
| 数据来源    | E <sub>4</sub> (冬小麦) |          |          | J <sub>3</sub> <sup>1</sup> (棉花) |          |           | E <sub>4</sub> (冬小麦、夏玉米) |          |         |

之前较小,如 1994 年 4 月末灌溉之前,土壤水储量和可利用量最小,分别为 571 mm 和 216 mm;雨季(6 月至 7 月)最大,土壤水储量达 (735~ 738)mm,土壤水可利用量为 (380~ 383) mm;雨季之后再度减小。然而,在试验条件下实际土壤水储量远大于土壤水无效库容 355 mm,也大于所谓“理论下限土壤水储量”495 mm,说明土壤水资源还未得到充分利用。如麦田 4 月 17 日土壤水储量为 571 mm,从充分利用土壤水的角度讲,4 月 18 日灌溉尚早了些。当然,实际田间灌溉计划还应考虑作物不同生长期对需水的下限要求,上述以土壤水无效库容或“理想下限土壤水储量”作为下限均未考虑作物不同生长期生理需水下限的变化,是从平均意义上讲的。

综上所述,研究区土壤水资源的变化主要受气象条件、灌溉等因素影响,一般雨季土壤水可利用量大,而旱季小。研究区土壤水无效库容为 355 mm,土壤水最大次调节量为 314 mm。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Renquan, Jin Menggui, Sun Lianfa et al *System s Analysis of Agriculture- Water Resources- Environment in Hebei Plain*. Australia: Proceedings of the IAH Congress, 1994
- 2 朱福星, 王金珍. 四维治水——黄淮海平原农业水资源综合治理配套技术. 北京: 科学出版社, 1993. 57—61
- 3 雷志栋, 杨诗秀, 倪广恒等. 地下水位埋深类型与土壤水分动态特征. 水利学报, 1992, (2): 1—6
- 4 Hillel D. *Applications of Soil Physics* New York: Academic Press, 1980
- 5 de Laat P J M. *Agriculture Hydrology*. The Netherlands: IHE, Delft, 1985
- 6 Kabat P, van den Broek B J, Feddes R A. *Water Dynamics in the Unsaturated Zone*. Wageningen: ICW, 1989

## CHARACTERISTICS OF SOIL WATER RESOURCE AND SOME EVALUATING INDEXES

Jin Menggui

*(Department of Hydraulic Engineering, Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan, 430072)*

Zhang Renquan Gao Yunfu Sun Lianfa

*(Faculty of Environmental Science and Geotechnique, China University of Geosciences, Wuhan, 430074)*

**Abstract** Based on the analysis of soil water balance considering crop transpiration, the concept of soil water resource and its characteristics such as dependence on precipitation, easy consumption, unable exploitation, usability on site and possibility to be controlled are discussed. The ideal unusable reservoir, the maximum adjustable capacity, the usable amount of soil water resource, etc are proposed to evaluate the characteristics of soil water resource. The ideal unusable reservoir and the maximum adjustable capacity in the Wangtong experimental station, Hebei, China are 355 mm and 314 mm respectively. The storage and the usable amount of soil water resource vary with the situations of meteorology, irrigation and crop growing. The usable amounts of Wangtong in 1994 and 1995 are in the order of (210-380) mm, and the storage of (570-730) mm.

**Key words** soil water resource, characteristics, evaluation, management