

含碎石土壤的含水量测定误差分析*

马东豪^{1,2} 邵明安³

(1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程实验室, 北京 100101)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 中国科学院水利部西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘 要 碎石的存在增加了土壤含水量测定的难度, 为便于应用, 一些学者将碎石当作细土或不透水介质处理, 这在一些情况下可能产生很大误差。本文对忽略碎石或其含水量所引起的土石混合介质和细土含水量的误差进行了分析, 并用室内实验验证了所得到的结果与相对误差的关系。结果表明, 细土和土石混合介质含水量的相对误差与碎石含量以及碎石与细土含水量的比值有关。当碎石与细土含水量比值很大时, 即便碎石含量很低也会产生很大误差; 而当碎石与细土含水量比值很小时, 高的碎石含量同样导致很大误差。此外, 碎石与细土含水量的相对大小并非常数, 而是随含水量变化的。因此, 对土石混合介质田间水分状况的准确监测, 以及水分和溶质迁移过程的定量模拟需要考虑碎石特性的影响。

关键词 土石混合介质; 土壤含水量误差; 碎石含量; 碎石与细土含水量比值

中图分类号 S152 **文献标识码** A

由于成土过程及人类活动的影响, 常常会出现碎石覆盖和土壤夹杂砾石层的现象, 这类土壤在西欧占到 30%, 地中海地区达 60%, 东非和西非高原也尤为普遍^[1]。土石山区在我国也有广泛分布, 约占我国国土面积的 17.6%。所以, 含碎石土壤是一类重要的土地资源。但由于碎石的存在改变了土壤的结构特性, 使土体过水断面减少, 大孔隙及孔隙弯曲度增加, 土壤的水分特征曲线, 导水率呈现出随碎石含量、尺寸和形状的变化特征, 同时也改变了土壤表层的水热状况, 增加了地表糙率。因而, 含碎石土壤的水分和溶质运动可能呈现出与均质土壤不同的特征, 土石混合介质中水分和溶质运移规律的研究对于定量研究土石山区的生态水文循环过程, 指导我国西北和西南土石山区植被恢复和重建具有重要意义。

国内外学者就土石混合介质中水分运动特征和相关模型进行了大量研究^[2~11], 内容包括含碎石土壤的取样方法、含水量测定、碎石水力特性、以及碎石对土壤水力特性、水分有效性、入渗和蒸发的影响等方面。这些研究中存在的难点问题之一就是碎石含量及混合介质含水量的准确测定。由于碎石往往分布不均, 含量测定比较困难, 随之带来含碎石土壤水分测定困难等问题, 因此常直接测定容易获得的

细土含水量, 以此作为衡量含碎石土壤整体的水分能量状况及植物可利用的有效水分的依据, 即需要通过细土含水量计算含碎石土壤的整体含水量。此外, 对于一些能测定含碎石土壤整体水分状况的方法(如 TDR 法、中子仪法等), 也需要通过含碎石土壤整体水分状况知道土壤水分实际的能量状态, 即对植物水分养分供给起主要作用的细土的水分和能量状况。上述两个问题在含碎石土壤分布广泛地区的农业生产及水文生态过程的研究中经常遇到。为方便计算, 一些学者通过对含碎石土壤的简化处理得到含碎石土壤总含水量或细土含水量的近似值, 常用做法是: (1) 不考虑碎石影响, 即将碎石作为细土处理; (2) 考虑碎石含量, 但将碎石看作不透水介质。

Coile^[12]最早发现碎石中能储存一定的水分, 并能为植物吸收和利用, 这一结果表明碎石对土壤水文和化学过程的影响可能远较人们预想的要大。忽略碎石含水量的做法最为常见, 其所产生的误差也往往被忽视, 但在碎石含量很高的情况下, 碎石所含水分在土壤总有效水分中可能占有很高的比例, 并且碎石的持水能力并非总是小于细土, 风化程度较重的碎石可能具有更大的孔隙度, 因而能吸持更多的水分, 并且其孔隙结构可能不同于细土。一些学

*国家自然科学基金项目(50479063)和中国西部环境与生态重大研究计划(90502006)资助

作者简介: 马东豪(1980~), 男, 汉族, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事土壤物理相关领域的研究。E-mail: madh.05b@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2006-11-07; 收到修改稿日期: 2007-01-22

者分别对不同类型碎石的持水特性做了大量的研究^[13~19],根据这些研究结果,部分碎石所含有效水分的体积分数如下:沉积岩为15%^[13],风化的花岗岩为11%^[14],砂岩和页岩分别为11%和23%^[15],粉砂岩为10%^[16],沉积的腐泥土可达43%^[17]。Brouwer和Anderson^[18]对澳大利亚东南部地区土壤中铁矿石碎片持水性的研究发现,碎石含水量即便在-1500 kPa下仍可达到 $0.24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$,在-20 kPa下最高可达 $0.36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$,忽略碎石存在,土壤有效水量可高估8%~67%。Cousin^[19]对法国巴黎南部两块试验田的研究结果表明,如果忽略碎石存在,计算的有效水量高估39%,渗漏量低估14.9%;考虑碎石容积,但忽略其持水特性,计算的有效水量则会低估34%,渗漏量高估15.8%。因此,对于风化严重的碎石,尤其是在碎石含量较高的情况下,碎石对混合介质总含水量的贡献甚至超过细土,忽略碎石含水量所产生的误差可能更大。

可见含碎石土壤的持水特性与均质土壤存在很大差别。因此,研究碎石土壤的持水特性对于准确理解和模拟土石混合介质中的水分和溶质运动过程有重要意义。目前,对于上述含碎石土壤含水量的简化计算所产生的误差分析尚未见系统的分析和评价,本文结合理论与实验研究系统分析了忽略碎石或碎石持水特性对含碎石土壤总含水量或细土含水量计算误差的影响,为含碎石土壤含水量测定及土壤有效水的计算提供依据。

1 理论分析

在国际分类制中,凡粒径 $> 2 \text{ mm}$ 的颗粒都看作石砾或碎石(rock fragment),粒径 $< 2 \text{ mm}$ 的颗粒作为细土(fine earth),细土粒径分布作为土壤质地界定的主要依据^[20]。因为碎石的孔隙特性和密度可能与细土有所不同,其所具有的水力特性也会存在差别,对土壤水分和溶质运动可能呈现出不同的作用,所以通常分开考虑它们的含水量。含碎石土壤总的含水量可以用碎石和细土各自含水量及其质量或体积分数表示,其表达式为^[5, 21]:

$$m_T = (1 - R_m) m_s + R_m m_r \quad (1)$$

$$V_T = (1 - R_v) V_s + R_v V_r \quad (2)$$

式中, m_T 、 m_s 和 m_r 分别为混合介质、细土和碎石的质量含水量; V_T 为混合介质的体积含水量, R_m 为碎石质量含量, R_v 为碎石体积含量。由于形式和方法类似,在下面的分析中,仅以式(1)为例说明碎石对

土壤含水量的影响。

假定 $\beta = m_r/m_s$,为碎石和细土的质量含水量比值, $m_s = 0.1$,根据式(1)绘制土石混合介质含水量与碎石含量 R_m 及碎石和细土质量含水量比值的关于图1。由图1可知,在有碎石存在的情况下,土石混合介质含水量随碎石和细土质量含水量比值的增加而增加。当 $\beta < 1$ 时,混合介质含水量随碎石含量增加而减小;当 $\beta = 1$ 时,混合介质含水量与碎石含量无关;当 $\beta > 1$ 时,混合介质含水量随碎石含量增加而增加。这表明,碎石与细土含水量的相对大小影响土石混和介质含水量与碎石含量的关系,应作为土石混和介质水力特性中一个重要参数。

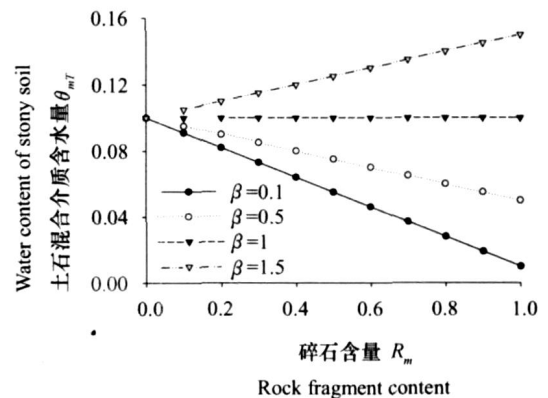


图1 土石混合介质含水量

Fig. 1 Water content of stony soil

1.1 忽略碎石引起的相对误差

不考虑碎石的存在($R_m = 0$),即将碎石当作细土处理,由式(1)可知,细土和土石混合介质含水量相等,即

$$m_T = m_s \text{ 和 } m_s = m_T \quad (3)$$

式中, m_T 和 m_s 分别为忽略碎石预测的混合介质和细土含水量。则由式(1)和式(3)可得到忽略碎石后土石混合介质含水量预测的相对误差(RE_{rT})和细土含水量预测的相对误差(RE_{rs})分别为

$$RE_{rT} = \frac{m_T - m_s}{m_T} = \frac{1}{\frac{1}{R_m \cdot (1 - \beta)} - 1} \quad (4)$$

$$RE_{rs} = \frac{m_s - m_r}{m_s} = -R_m \cdot (1 - \beta) \quad (5)$$

式中, $\beta = m_r/m_s$,为碎石和细土的质量含水量比值。

式(4)和式(5)表明,忽略碎石所引起的土石混合介质与细土含水量相对误差仅与碎石含量和碎石与细土含水量比值有关,而与碎石含水量无关。式

(4)和式(5)计算的混合介质和细土含水量相对误差分别显示于图2和图3中。

由图2和图3可知,当 $\beta < 1$ 时,式(3)预测的混合介质含水量偏高,细土含水量偏低,其相对误差均随碎石与细土含水量比值的增加而减小;当 $\beta = 1$ 时,忽略碎石不会造成混合介质和细土含水量计算误差;当 $\beta > 1$ 时,情况与 $\beta < 1$ 时恰好相反。此外,无论 $\beta < 1$ 还是 $\beta > 1$,由式(3)计算混合介质含水量和细土含水量所引起的相对误差均随碎石含量的增加而增加。

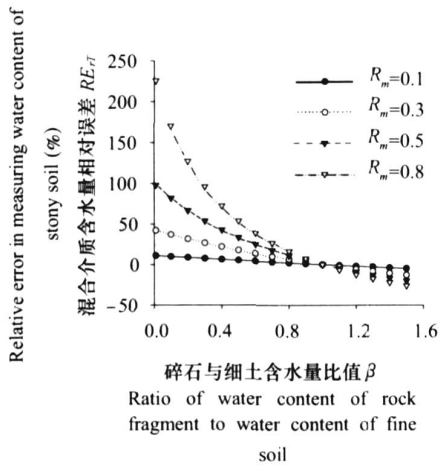


图2 混和介质含水量相对误差(忽略碎石)

Fig.2 Relative error in measuring water content of stony soil (Rock fragment neglected)

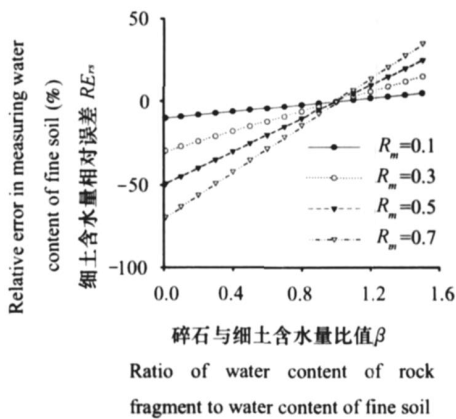


图3 细土含水量相对误差(忽略碎石)

Fig.3 Relative error in measuring water content of fine soil (Rock fragment neglected)

1.2 忽略碎石含水量引起的相对误差

由于不考虑碎石给土壤水分运动的模拟及实际有效水分的计算带来很大误差,一些学者^[5, 21~23]先后提出用碎石含量校正土壤含水量。碎石风化程度不高的情况下,Ravina和Magier^[21]认为其含水量很低,相对可以忽略不计(即 $m_r = 0$),式(1)可近似为:

$$m_T = (1 - R_m) m_s \text{ 和 } m_s = m_T / (1 - R_m) \quad (6)$$

式中, m_T 和 m_s 分别为忽略碎石含水量预测的混合介质和细土质量含水量。Gardner^[22]、Khaleel和Relyea^[23]也曾用上述方法校正混合介质含水量,只不过形式略有不同。

结合式(1)和式(6)同样可得到忽略碎石含水量,土石混合介质含水量预测的相对误差(RE_{wT})和细土含水量预测的相对误差(RE_{ws})分别为:

$$RE_{wT} = \frac{m_T - m_T}{m_T} = - \frac{1}{1 + \frac{1}{R_m}} \quad (7)$$

$$RE_{ws} = \frac{m_s - m_s}{m_s} = \frac{R_m}{1 - R_m} \quad (8)$$

式(7)和式(8)表明,忽略碎石含水量所引起的土石混合介质与细土含水量相对误差仅与碎石含量和碎石与细土含水量比值有关。式(7)和式(8)计算的混合介质和细土含水量相对误差分别显示于图4和图5中。

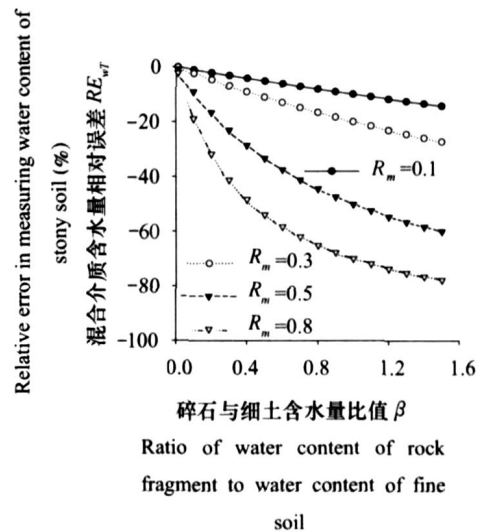


图4 混和介质含水量相对误差(忽略碎石含水量)

Fig.4 Relative error in measuring water content of stony soil (Water content of rock fragment neglected)

由图4和图5可知,忽略碎石含水量,式(6)预测的混合介质含水量普遍偏低,细土含水量普遍偏高,其相对误差随碎石与细土含水量比值以及碎石含量的增加而增加。通常情况,碎石含水量小于细土,式(6)所引起的相对误差对碎石含量比较敏感,当 $R_m > 0.2$ 时,混合介质和细土含水量计算相对误差很容易超过10%。

令 $\alpha = R_m / (1 - R_m)$, 则为土石混合介质中碎

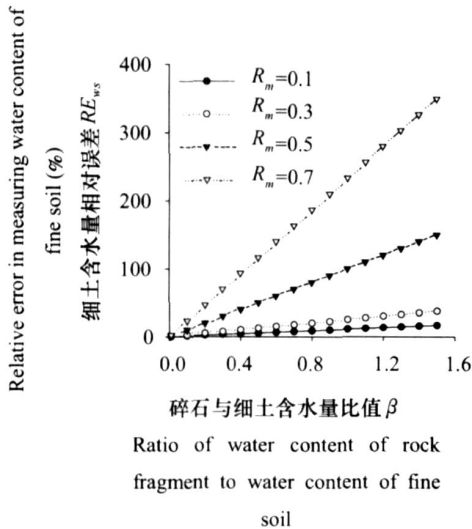


图5 细土含水量相对误差(忽略碎石含水量)
Fig.5 Relative error in measuring water content of fine soil
(Water content of rock fragment neglected)

石与细土的质量分数比值,代入式(7)和式(8)可得:

$$RE_{wT} = - \frac{1}{1 + \frac{1}{m_{nw}/m_{sw}}} = - \frac{1}{1 + \frac{1}{m_{nw}/m_{sw}}} \quad (9)$$

$$RE_{ws} = \frac{R_m}{1 - R_m} \cdot \frac{m_r}{m_s} = \frac{m_{nr}}{m_{sw}} \quad (10)$$

式中, m_{nr} 和 m_{sw} 分别为土石混合介质中碎石和细土所含的水分质量。式(9)和式(10)进一步表明,忽略碎石含水量,式(6)预测的土石混合介质及细土含水量相对误差仅与混合介质中碎石与细土所含水分质量的比值唯一相关。

2 实验检验

为验证上述误差分析公式,并研究实际土壤中碎石与细土的持水特性关系,取陕北神木六道沟实验站的土石混合介质为研究对象,进行了室内稳态平衡实验。野外取样时,用环刀法测定自然土壤容重为 1.4 g cm^{-3} 。所取土样自然风干,然后用 2 mm 的筛子将细土 ($< 2 \text{ mm}$) 和碎石 ($> 2 \text{ mm}$) 分开,为避免碎石尺寸影响,实验选取当地含量最高的 $20 \sim 30 \text{ mm}$ 粒级的碎石。用比重瓶测定细土颗粒密度为 2.59 g cm^{-3} ,排水法测定碎石密度为 2.63 g cm^{-3} ,容重为 1.98 g cm^{-3} ,烘干法测定细土和碎石的初始质量含水量分别为 1.15% 和 0.44% ,饱和含水量分别为 32.8% 和 11% 。配置碎石质量含量为 30% 的 14 份土样,分别装入直径 12 cm 、高 5.5 cm 的 14 个密封盒内,每个盒内加入

不同质量的水,土样密封后放置至细土和碎石的水分质量交换达到平衡。 3 d 后称重可知土石混合介质的含水量,然后用刷子迅速分开细土和碎石,用 105°C 烘干法分别测定各自含水量,细土烘干时间为 8 h ,碎石为 24 h 。这样就得到土石混合介质、碎石和细土在不同水分状况下的平衡含水量。

图6和图7分别显示了忽略碎石(式(3)),忽略碎石含水量(式(6)),以及考虑碎石特性(碎石含量及其含水量,式(1)),混合介质和细土含水量的预测值与实测值的比较。图6和图7表明,考虑碎石特性可以很好地预测混合介质和细土含水量,而忽略碎石致使混合介质含水量预测值偏高,细土含水量预测值偏低;忽略碎石含水量,混合介质含水量预测值偏低,细土含水量预测值偏高。预测误差与混合介质含水量并无明显关系,下文对此将做详细讨论。

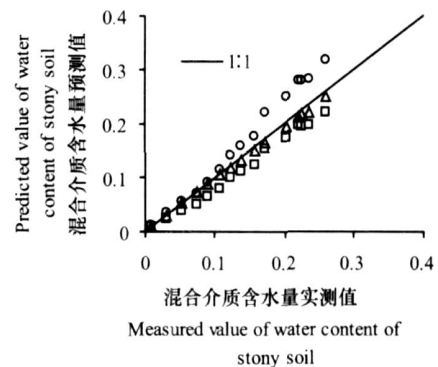


图6 混和介质含水量预测值与实测值比较(忽略碎石,忽略碎石含水量,考虑碎石特性)

Fig.6 Comparison between predicted and measured values of water content of stony soil (Rock fragment neglected, Water content of rock fragment neglected, Properties of rock fragment considered)

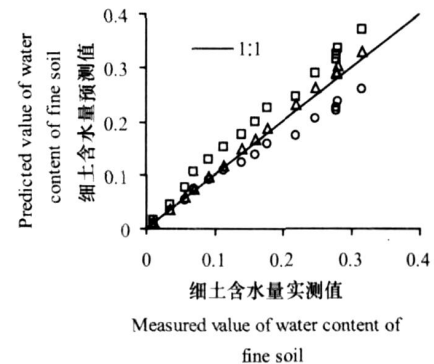


图7 细土含水量预测值与实测值比较(忽略碎石,忽略碎石含水量,考虑碎石特性)

Fig.7 Comparison between predicted and measured values of water content of fine soil (Rock fragment neglected, Water content of rock fragment neglected, Properties of rock fragment considered)

图 8 显示了碎石与细土含水量比值随混合介质含水量的变化关系。由图 8 可知,碎石与细土含水量比值不是一个定值,而是随混合介质含水量的增加先增后减。这表明,碎石的孔隙分布与细土截然不同,因而具有不同的持水特征。这与 Cousin^[19]的发现一致,Cousin 通过比较压力板法测定的细土和碎石水分特征曲线发现,碎石的持水量随基质吸力增加可能减小,也可能不变。由图 8 还可发现,碎石与细土含水量比值的变化范围在 0.1~1.2 之间,最大值大于 1,出现在混合介质质量含水量为 0.08 左右。这表明,即便对于风化不很严重的碎石,其持水量也并非总小于细土,在低含水量时,碎石的持水量也可能大于细土,成为植物可利用水分的主要来源。

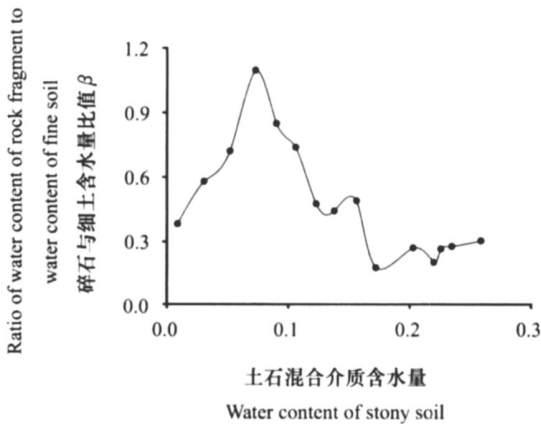


图 8 碎石与细土含水量比值随混合介质含水量的变化
Fig. 8 Variation of ratio of water content of rock fragment to fine soil with water content of stony soil

图 9 和图 10 分别显示了由式 (4) 及式 (7) 计算的、以混合介质含水量和碎石与细土含水量比值表示的土石混合介质含水量在忽略碎石或碎石含水量情况下的相对误差。由图 9 可知,忽略碎石,混合介质含水量高估 10% 以上;忽略碎石含水量,则低估 10% 以上。并且相对误差与混和介质含水量之间无明显规律,而与碎石和细土含水量比值则呈显著的近似线性的变化规律(图 10),这与图 2 和图 4 在碎石含量为 30% 时得到的理论结果是一致的。测定的细土含水量相对误差与混和介质含水量相对误差类似,与碎石和细土含水量比值呈显著近似线性关系,数据未列出。

3 小 结

本文对忽略碎石或碎石含水量的土石混合介质和细土含水量测定方法产生的误差进行了理论分

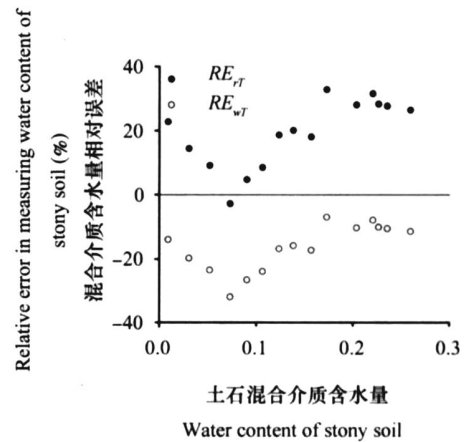


图 9 以含水量表示的相对误差

Fig. 9 Relative error expressed in water content of stony soil

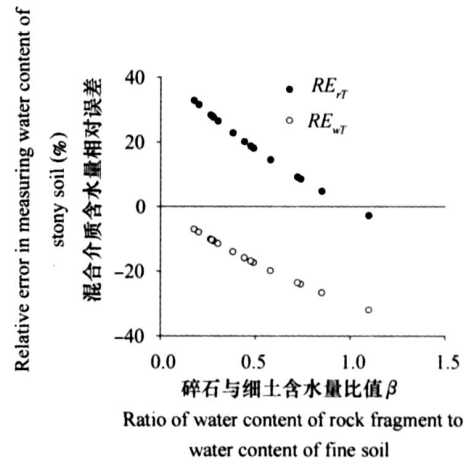


图 10 以含水量比值表示的相对误差

Fig. 10 Relative error expressed in ratio of water content of rock fragment to water content of fine soil

析,并用实测实验数据检验了预测相对误差的理论公式。分析发现,无论是土石混合介质还是细土含水量,忽略碎石或细土含水量所产生的相对误差的大小仅与碎石含量和碎石与细土含水量的比值有关。实验结果表明,实测数据得到的规律与误差的理论预测结果一致。此外,碎石与细土存在不同的持水特性,随着吸力的变化,即便风化不严重的碎石,其含水量也可能等于甚至超过细土含水量。这不仅意味着,忽略碎石或碎石含水量的相对误差可能随吸力或土石混合介质含水量发生变化,并且随吸力的变化,碎石在土壤水分运动中可能起到极为显著的作用。

参 考 文 献

[1] Poesen I, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and

- processes. *Catena*, 1994, 23: 1 ~ 28
- [2] Fleming R L, Black T A, Eldridge N R. Water content, bulk density, and coarse fragment content measurement in forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 261 ~ 270
- [3] Eriksson C P, Holmgren P. Estimating stone and boulder content in forest soils-evaluating the potential of surface penetration methods. *Catena*, 1996, 28: 121 ~ 134
- [4] Reinholt K G. The problem of stones in soil-moisture measurement. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1961, 25: 268 ~ 270
- [5] Sharma P P, Carter F S, Halvorson G A. Water retention by soils containing coal. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 311 ~ 316
- [6] Mehuis G R, Stolzy L H, Letey J, *et al.* Effect of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1975, 39: 37 ~ 42
- [7] Barkensiek D L, Rawls W J, Stephenson G R. Determining the saturated hydraulic conductivity of a soil containing rock fragments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986, 50: 834 ~ 835
- [8] Valentin C, Casenave A. Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 667 ~ 673
- [9] Cerd A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 59 ~ 68
- [10] van Wesemae B, Poesen J, Kosmas C S, *et al.* The role of rock fragments in evaporation from cultivated soils under Mediterranean climatic conditions. *Phys. Chem. Earth*, 1995, 20 (3/4): 293 ~ 299
- [11] van Wesemae B, Poesen J, Kosmas C S, *et al.* Evaporation from cultivated soils containing rock fragments. *Journal of Hydrology*, 1996, 182: 65 ~ 82.
- [12] Coile T S. Moisture content of small stones in soil. *Soil Science*, 1953, 75: 203 ~ 207
- [13] Zvieniecki M A, Newton M. Water-holding characteristics of meta-sedimentary rock in selected forest ecosystems in southwestern Oregon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1 578 ~ 1 582
- [14] Jones D P, Graham R C. Water-holding characteristics of weathered granitic rock in chaparral and forest ecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 256 ~ 261
- [15] Hanson C T, Blevins R L. Soil water in coarse fragment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, 43: 819 ~ 820
- [16] Montagne C, Ruddell J, Ferguson H. Water retention of soft siltstone fragments in an Ustic Torriorthent, central Montana. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 555 ~ 557
- [17] Newton M, Ortiz-Funez A, Tappeiner J C. Pine and manzanita pull water out of rocks. *Forestry Intensified Res. Rep. 10. Oregon State Univ. Extension Service, Corvallis. 1988*
- [18] Brouwer J, Anderson H. Water holding capacity of ironstone gravel in a typic plinthertal in southeast Australia. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 1 603 ~ 1 608
- [19] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 2003, 53: 97 ~ 114
- [20] 秦耀东. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2003. 1 ~ 4. Qin Y D. *Soil Physics (In Chinese)*. Beijing: Higher Education Press, 2003. 1 ~ 4
- [21] Ravina I, Magier J. Hydraulic conductivity and water retention of clay soils containing coarse fragments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48: 736 ~ 740
- [22] Gardner W R. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 1958, 85: 228 ~ 232
- [23] Khaleel R, Relyea J F. Correcting laboratory-measured moisture retention data for gravels. *Water Resour. Res.*, 1997, 33 (8): 1 875 ~ 1 878

DETERMINATION ERROR OF WATER CONTENT IN STONY SOIL

Ma Donghao^{1,2} Shao Ming'an³

(1 *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(3 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Northwest Science and Technical University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract Existence of rock fragments in soil makes it more difficult to measure water content of the soil. Some researchers take rock fragments as fine soil or impermeable media for the convenience of calculation, but this may lead to big errors in some situations. Analysis of these errors was conducted. Indoor experiments were carried out to validate the formula for calculating relative errors. Results indicate that the relative error in measuring water content of fine soil or soil-fragment mixture media was related to rock fragment content and ratio of water content of rock fragment to fine soil. When the ratio was high, big error may result even if the rock fragment content was low; and when the ratio was very low, high rock fragment content also induced great error. In addition, the ratio was not a constant, but varied with their water contents. Therefore, the hydraulic properties of rock fragments need considering in the study on monitoring accurately water regime and simulating quantitatively water and solute transport processes in fields of stony soil.

Key words Stony soil; Relative error; Rock fragment content; Ratio of water content of rock fragment to fine soil