

由灌溉引起的黄土湿陷过程中碳酸钙行为研究

郭玉文^{1,3} 张玉龙² 党秀丽² 加藤诚³

(1 中国环境科学研究院, 北京 100012)

(2 沈阳农业大学土地资源与环境学院, 沈阳 110161)

(3 东京农工大学, 日本东京 183-0051)

摘要 长期以来, 有关黄土湿陷的研究一直忽视对碳酸钙行为的探讨。本研究利用扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱分析 (EDX) 技术研究了黄土中碳酸钙的分布, 通过室内模拟实验, 探讨了由灌溉引起的黄土湿陷过程中碳酸钙的行为, 初步得出以下结论: 黄土颗粒间存在大量碳酸钙, 在黄土湿陷过程中碳酸钙发生淋溶、移动损失, 其中以移动损失为主, 溶解损失相对较少。碳酸钙的移动损失量随透水量增加而增加, 在下部土层发生聚集。

关键词 黄土; 湿陷; 碳酸钙; 淋溶; 移动

中图分类号 S274.6 **文献标识码** A

黄土湿陷是在外力 (荷载或自重) 和水的共同作用下发生的地表塌陷。在我国约 $64 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的典型黄土分布区中, 约有 60% 的黄土存在不同程度的湿陷。黄土地区的很多工程地质灾害均与其湿陷引起地基沉陷有关。因此, 从工程地质和土力学的角度, 很多学者进行过较为系统的研究, 并在湿陷发生机理、湿陷过程中的应力-应变关系以及湿陷模型等方面取得了一些成果^[1-4]。由灌溉引起的黄土湿陷属自重湿陷, 造成这种灾害的原因是因为过量灌水引起土壤内部结构的变化。在我国黄土地区, 由于降水不足以满足农作物生长需要而建立引水灌溉工程的地方很多, 其中有多少灌溉农田出现湿陷问题尚无统计数字, 但是由灌溉引起的黄土湿陷问题必须引起足够的重视。目前, 有关这方面的研究报道很少。

典型黄土具有湿陷性和富含碳酸钙两大特点。在黄土灌区, 灌溉方式主要是漫灌, 过量的灌水进入农田土壤, 势必对土壤中碳酸钙的行为产生重要影响。但是, 由于碳酸钙的难溶性, 目前国内外有关黄土湿陷的绝大多数研究忽略了对碳酸钙的探讨。黄土中的碳酸钙作为其团粒结构的主要胶结物^[5-8], 在维持黄土结构的稳定性上发挥重要作用。研究黄土湿陷, 尤其是由灌溉引起的黄土湿陷, 不探讨湿陷过程中碳酸钙的行为, 就无法从根本上探讨湿陷产生的机理。因此, 本研究利用扫描电子显

微镜 (Scanning electron microscope, 简称 SEM) 和 X 射线能谱 (X-ray energy dispersive microanalysis, 简称 EDX) 分析技术探讨了黄土中碳酸钙的分布, 通过室内湿陷模拟实验研究了黄土湿陷过程中碳酸钙的淋溶、移动, 旨在揭示由灌溉引起的黄土湿陷发生机理, 为减少湿陷发生提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究调查地点位于黄土高原西部甘肃省永靖县黑方台 (兰州西 60 km, 黄河北岸 4 级阶地)。年均降水量 316 mm, 蒸发量 1 689 mm。该地区自 1968 年开始引黄河水灌溉农田, 灌溉农田面积为 812 hm^2 , 约占农田总面积的 88.9%。年平均灌溉水量 825 mm, 分 5 次灌溉。至 1993 年, 黑方台台面几乎均发生不同程度的湿陷, 湿陷深度在 1 m 以下的农田约占总面积的 72%^[9]。

1.2 供试材料

用环刀取黑方台灌溉农田土壤非扰动土。根据实验目的不同, 环刀大小有 2 种: (1) 直径 6.0 cm, 高 2.0 cm; (2) 直径 7.5 cm, 高 5.0 cm。使用材料 (1) 和 (2) 分别进行以下实验。

1.3 扫描电子显微镜实验

使用材料 (1), 取部分风干后样品放入小容器

中,加入酚醛树脂(树脂:固化剂=2:1),室温静置24 h,固化后用切割机切割成厚约3 mm样品,经砂纸研磨、抛光布抛光、清洗、喷金(Au)(JFC-1100)处理后,用扫描电子显微镜(JSM-5500 SEM/EDX)测定黄土中碳酸钙的分布。

1.4 黄土湿陷模拟实验

使用压密试验装置在荷载 29.4 kN m^{-2} 条件下分别进行以下室内湿陷模拟试验。

1.4.1 湿陷过程中碳酸钙的淋溶实验 将材料(1)装入小型压密实验装置(Osaka Marui Japan G-2406-1)中,加荷,荷载变形结束后用空气泵以 3.0 ml min^{-1} 的速度从实验上部加蒸馏水,每隔一定时间间隔读取刻度表的读数(湿陷量),并采集实验材料下部排出水,测定其中阴阳离子浓度(阳离子采用原子吸收分光光度计(日立 Z-8100)法,阴离子 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 采用离子色谱(自组装设备,自动进样器-JASCO 851-A5 恒温箱-JASCO 860-CO,电导率测定仪-SHOWA Shodex CD-4)法,阴离子 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 采用滴定法(日本土壤标准分析方法)。待4h时间间隔的变形量小于 $1/100 \text{ mm}$ 时结束湿陷实验。

1.4.2 湿陷过程中碳酸钙的移动试验 将材料(2)装入中型压密试验装置中,加荷,荷载变形结束后以与(1)同样方式加水进行湿陷实验。因实验目的不同分为以下两部分。

A. 碳酸钙移动分析实验

湿陷实验结束后样品静置1 d从压密试验装置中取出样品,分别取0~1.0 1.0~2.0 2.0~3.0 3.0 cm以下样品进行风干。风干后的样品利用重量法^[10]测定不同深度土样中碳酸钙含量。

B. 不同透水量条件下碳酸钙移动损失量测定实验

当试验材料下部排出水量分别为1.0 5.0 10.0 L时结束湿陷实验。按与A相同方法分别采取0~1.0 1.0~2.0 2.0~3.0 3.0 cm以下样品并测定其碳酸钙含量。

使用未经湿陷实验处理的实验材料作为对照,重复上述A、B实验。

2 结果与讨论

2.1 黄土颗粒间碳酸钙的分布

经测定分析,本研究所用实验材料中碳酸钙含量为 136.1 g kg^{-1} 。

图1a为利用扫描电子显微镜观察到的未经试验处理的黄土微结构。由图1a可以看出,黄土的微结构主要由 $30 \mu\text{m}$ 以下的颗粒重叠排列而成,在这些颗粒中间,部分为更小的颗粒充填,部分为空隙。利用SEM/EDX的元素图谱(Element mapping)技术对图1a所示黄土微结构进行元素分布分析,结果如图1b所示。图像由Si Al Ca组成。

从土壤化学组成来看,土壤中原生矿物几乎均由 SiO_2 或者硅酸盐组成,黏土矿物则主要是由Si四面体或Al八面体构成的结晶态或非结晶态硅酸盐以及游离态铝硅酸盐组成。因此,土壤中无论是原生矿物还是黏土矿物,其化学组成中最多的元素是Si O Al。在样品固定时使用树脂(成分中有O),树脂充填孔隙,导致矿物颗粒间孔隙中因树脂O的存在也有大量O的分布。在兰州地区黄土中的Ca以碳酸钙为主,硫酸钙约为碳酸钙的1%~2%^[5]。由此可以认为本研究的实验材料中Ca几乎均以碳酸钙形式存在。因此,选择以Si Al分布代表黄土中矿物颗粒分布,以Ca分布表示碳酸钙分布,这样就可以通过比较黄土显微结构中Si Al Ca分布,探讨黄土微观结构中碳酸钙的分布。由图1b可以看出,在Si Al之间有很多大小不一的Ca块分布,这说明在黄土矿物颗粒之间分布着很多碳酸钙。

图2为放大2000倍后黄土微结构图像。在图2a中,黄线以内部分为约 $30 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 的三角形块状颗粒,根据粒径大小推测其为细砂;蓝线以内部分分布着很多粒径在 $15 \mu\text{m}$ 以下的颗粒,推测其为粉粒和黏粒;红线以内部分分布着一些粒径小于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒。

图2a所示黄土微结构用元素图谱技术分析,结果见图2b。由图2b可知,图2a中黄线所示部分几乎均为Si可以判断其为石英。蓝线所示部分主要是Si或者是Si Al重复分布,可以推测其为铝硅酸盐或者是铝硅酸氧化物,红线所示部分是Ca可以判明其为碳酸钙。由此推断在图2a所示黄土微结构中,在砂粒、粉粒和黏粒之间清楚地分布着碳酸钙。这说明在黄土组成基本颗粒间碳酸钙起到胶结物的作用,即黄土的原生矿物或黏土矿物颗粒由碳酸钙胶结而成集合体,而此集合体即为黄土中的团粒。

在黄土中,矿物颗粒和团粒共同起到骨架颗粒作用。在由灌溉引起的黄土湿陷过程中,在自重和水的共同作用下,矿物颗粒几乎不发生变形,而团粒稳定与否则很大程度上取决于其胶结物碳酸钙的

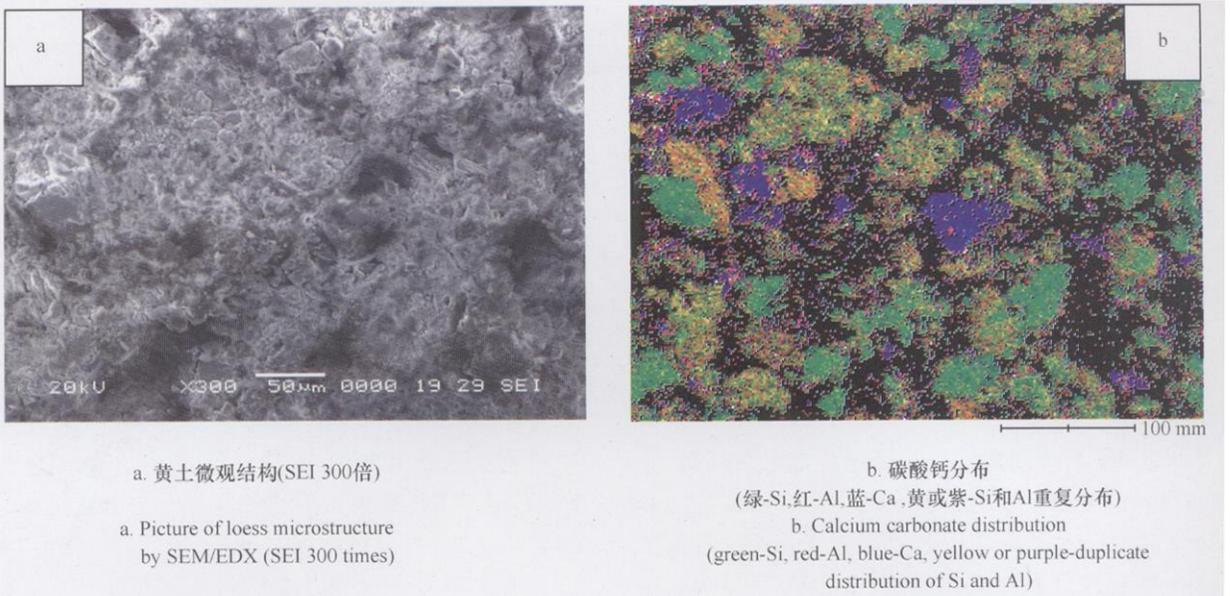


图1 黄土微观结构和碳酸钙分布

Fig. 1 Picture of loess microstructure and calcium carbonate distribution

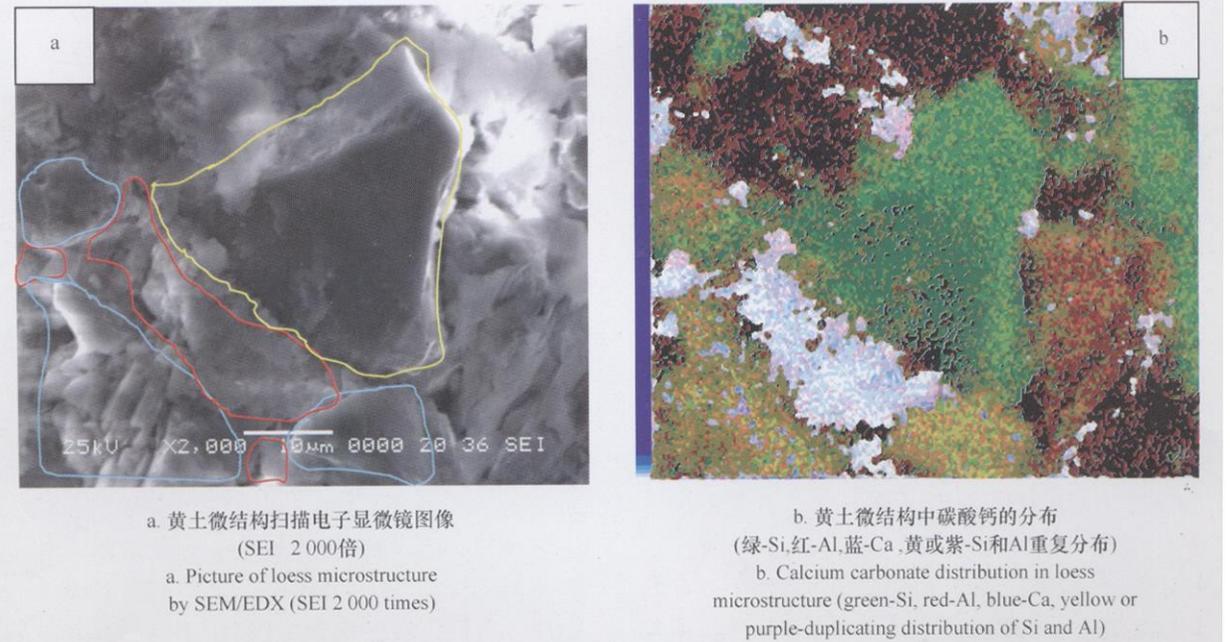


图2 黄土微观结构及碳酸钙分布

Fig. 2 Picture of loess microstructure and calcium carbonate distribution

变化。这就是本文研究黄土湿陷过程中碳酸钙的淋溶、移动的目的所在。关于黄土团粒与碳酸钙的关系, 作者已另有论述^[8], 在此忽略。

2.2 黄土湿陷过程中碳酸钙的淋溶

湿陷过程中碳酸钙的淋溶实验中, 试样下部排出水共为 8.8 L, 排出水中主要阳离子浓度如图 3a 所示。由图 3a 可以看出, 在透水量 400 m l 以内以

Na⁺ 浓度最高, 在此之后则 Ca²⁺ 浓度为最高。随着透水量的增加, Na⁺、K⁺ 浓度逐渐减小, 至透水量 1 500 m l 以后这 2 种阳离子浓度约为 0.1 mol L⁻¹ 以下。Mg²⁺ 浓度随透水量的增加逐渐减少, 而 Ca²⁺ 浓度自 500 m l 以后直至湿陷实验结束相对比较稳定, 一直约为 0.45~0.54 mol L⁻¹。

排出水中阴离子以 PO₄³⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 为

主(图 3b), CO_3^{2-} 和 NO_3^- 未检出。由图 3b 可以看出在这 4 种阴离子中, SO_4^{2-} 仅在第 1 个试样中检测出。透水量 400 ml 以内 PO_4^{3-} 和 Cl^- 浓度较高, 在透水量 800 ml 以后未检出。 HCO_3^- 浓度在透水量 1 500 ml 以后至试验结束几乎一直保持着 $0.2 \sim 0.24 \text{ cmol L}^{-1}$ 。

黄土湿陷过程中排出水中阴、阳离子浓度的变化与土壤中既存盐类有关。由阴、阳离子浓度随透水量变化曲线可知, 在透水量 300 ml 以内, 以可溶性的磷酸盐、碳酸盐和氯化物等为主。在透水量约为 500 ml 以后虽然 Ca^{2+} 以稳定浓度淋溶, 但是阴离子除 HCO_3^- 外尚有较低浓度的 PO_4^{3-} 和 Cl^- , 从盐类组成上来看无法判断土壤中的淋溶盐类。在透水量 800 ml 以后阴离子仅有 HCO_3^- , 由此可以判断在

透水量 800 ml 以后, 排出水中的 Ca^{2+} 主要来源于碳酸钙的分解。从图 3 还可以看出, 湿陷过程中, 自开始 Ca^{2+} 的溶出量就明显高于 HCO_3^- 离子的溶出量, 这一现象一直保持到 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的溶出趋于平衡, 说明湿陷中除碳酸钙外, 还伴随有其他形式的钙从黄土中溶出。

湿陷过程中, 在透水量 800 ml 以后, 排出水中阴离子仅为 HCO_3^- , 阳离子主要是 Ca^{2+} 。因此, 我们决定以透水量 800 ml 以后排出水中 Ca^{2+} 浓度和排出水量来推算湿陷过程中碳酸钙溶解量。经过计算得知, 在本研究黄土湿陷模拟实验过程中碳酸钙淋溶量约为 5.4 g kg^{-1} 。

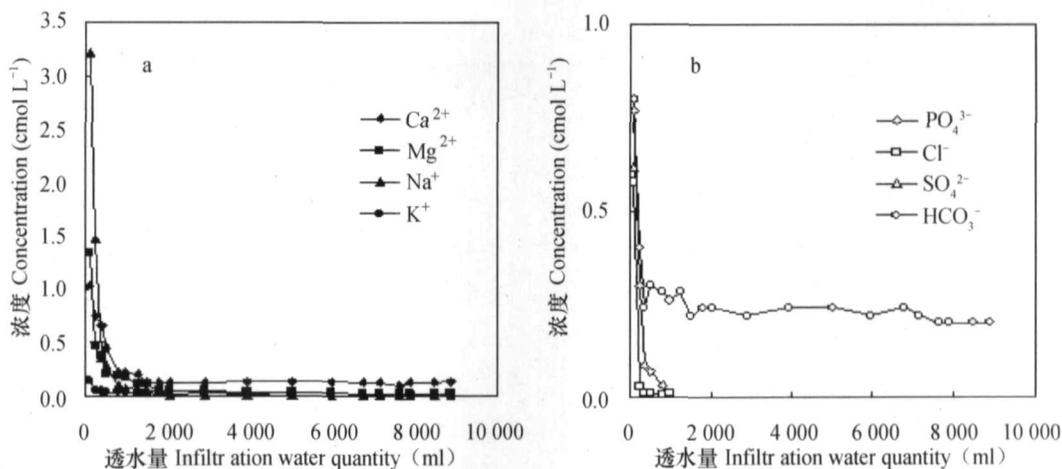
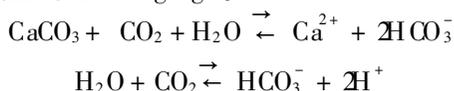


图 3 湿陷过程中阴阳离子浓度随透水量变化曲线 (a 阳离子, b. 阴离子)

Fig 3 Change in concentration of anions and cations with water percolation rate in the process of collapse (a cation, b. anion)

2.3 湿陷前后黄土中碳酸钙含量的变化

湿陷实验前后黄土中不同深度土层碳酸钙含量(或残留量)如图 4 所示。由图 4 可以看出, 湿陷实验前的自然黄土中不同深度土层之间碳酸钙含量差别很小, 其平均值约为 134.0 g kg^{-1} 。实验后不同深度土层中碳酸钙残留量的测定结果表明:

(1) 不同深度土层中碳酸钙残留量约为 $113.9 \sim 125.5 \text{ g kg}^{-1}$, 均明显低于湿陷实验前同一深度土层中碳酸钙含量, 这说明湿陷过程中明显存在碳酸钙的损失。(2) 湿陷过程中, 除碳酸钙溶解被淋溶外, 存在移动损失。其理由如下: 湿陷实验过程中, 同一样品内部不同深度土层透水量是相同的, 湿陷实验前样品内部不同深度土层碳酸钙含量基本相同, 因此同一透水量条件下碳酸钙的溶解量应该是基本相同的, 即同一样品内部的溶解损失减少量应该

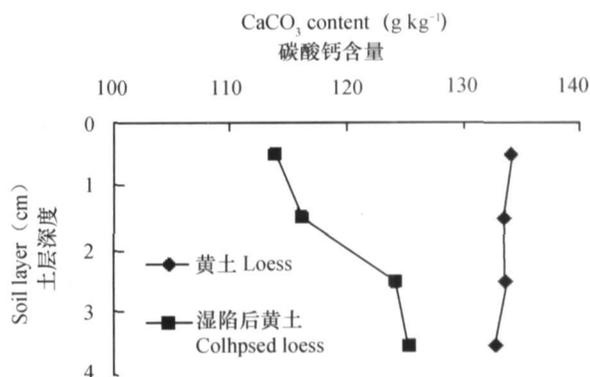


图 4 湿陷前后不同深度土层碳酸钙含量

Fig 4 Calcim carbonate content at different soil layers before and after collapse

是相同的, 残留量应与试验前保持一致的变化趋势。但从图 4 结果来看, 湿陷实验前的碳酸钙含量

与其湿陷实验后的残留量之差并不一致,呈自上而下减小的趋势。这说明碳酸钙除溶解损失外,也存在移动损失。(3)湿陷实验后样品中不同深度土层碳酸钙残留量呈随深度增加而增加的趋势。这清楚表明在湿陷过程中,在荷载和水分移动的共同作用下,伴随着水分的渗透,碳酸钙发生移动并在下层出现聚集。

2.4 不同透水量条件下的碳酸钙移动量

图 5 为不同透水量条件下碳酸钙的残留量(或含量)。由图 5 可知,每一透水量条件下的湿陷实验后样品中碳酸钙残留量均低于湿陷实验前样品的同一土层,且这一趋势随着透水量的增多而越发明显。在同一透水量条件下,除透水量 1 L 的试样中 0~1.0 cm 土层碳酸钙残留量高于 1.0~2.0 cm 土层其值外,其余各透水量的样品中上部土层中碳酸钙残留量均明显低于其下部各土层。其原因在于黄土湿陷过程中存在碳酸钙的淋溶和移动损失。从总体来看,碳酸钙损失量(湿陷实验前样品中黄土碳酸钙含量-湿陷实验后样品中碳酸钙残留量)呈随深度增加而减少、随透水量的增多而增加的趋势。碳酸钙残留量随深度增加而增加是由于上部移动损失的碳酸钙在下部土层出现聚集现象。

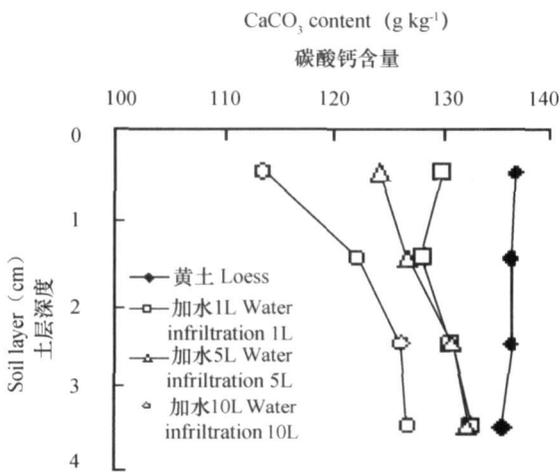


图 5 不同透水量条件下碳酸钙残留量

Fig. 5 Calcium carbonate content related to water percolation rate

3 结 语

本研究通过测定黄土湿陷过程中样品下部排出水中阴、阳离子浓度变化,揭示了该过程中碳酸钙的淋溶特性,即在湿陷过程初始阶段以可溶性盐淋溶为主,随着透水量的增加和可溶性盐的减少,

碳酸钙开始溶解并逐步达到以较稳定的溶解速率溶出。此外,相对于碳酸钙的淋溶量而言,湿陷过程中碳酸钙随渗透水移动损失更为明显。透水量仅为 1 L 时深 1.0 cm 土层中碳酸钙损失量(自然黄土中碳酸钙含量与湿陷后碳酸钙残留量之差)达 9.7 g kg^{-1} 干土(图 5)。这些研究结果表明,在黄土湿陷过程中,碳酸钙以移动损失为主,淋溶损失相对较少。尽管碳酸钙的淋溶量较少,但是其作用不能忽视,正是因为碳酸钙颗粒因溶解而变小,才使其通过孔隙移动成为可能。本研究测定了黄土颗粒间碳酸钙的分布,但没有针对湿陷后土壤孔隙中的填充物质进行分析。文献[11]对浸水试验后黄土试样微孔隙和虫孔道中白色填充物进行分析,结果表明这些填充物质为碳酸钙。该结果补充了本研究的内容。

到目前为止,综观有关黄土湿陷研究结果几乎均因碳酸钙难溶而忽视其对湿陷的影响。根据本研究结果,可以肯定以往对湿陷过程中碳酸钙的认识是远远不够的。因为碳酸钙作为黄土微结构中的骨架颗粒之一——团粒的胶结物,在维持黄土结构稳定性方面发挥着重要作用。在黄土湿陷过程中随碳酸钙的淋溶、移动损失,势必造成团粒结构的破坏,从而影响到黄土局部微结构的稳定性,这种微结构的破坏积累到一定程度,必然造成局部湿陷。因此,从黄土微结构考虑,在黑方台灌区,应多施用有机肥,改变土壤团粒胶结物的种类,促进由有机质胶结而成的团粒比例增加,从而减少由于碳酸钙的淋溶、移动导致团粒破坏带来的湿陷危害。此外,节水灌溉可以有效减少碳酸钙的淋溶、移动,耕作可改变碳酸钙淋溶、移动通道,也是减少湿陷危害的有效措施。

通过以上研究,初步得出以下结论:

- 1) 黄土颗粒间分布着大量碳酸钙,起到颗粒间胶结物的作用。
- 2) 黄土湿陷过程中碳酸钙发生淋溶损失,但溶解量较小。
- 3) 黄土湿陷过程中碳酸钙存在自上而下的移动损失,其移动损失量随透水量增加而增加。

参 考 文 献

- [1] 齐静静,徐日庆,龚维明,等.湿陷性黄土地区自平衡测试结果转换方式研究.浙江大学学报(工学版),2006,40(12): 2196~2200. Qi J J, Xu R Q, Gong W M, et al. Research on bearing capacity of cast-in-place piles in unsaturated to saturated loess (In Chinese). Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(12): 2196~2200.

- [2] 刘三仓, 隋国秀, 刘志伟. 非饱和-饱和状态下黄土地基中灌注桩承载性能的研究. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 147~151. Liu S C, Sui G X, Liu Z W. Research on bearing capacity of cast in place piles in unsaturated to saturated loess (In Chinese). Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2007, 29(1): 147~151
- [3] 邵生俊, 罗爱忠, 于清高, 等. 加荷增湿作用下 Q_3 粘黄土的结构损伤特性. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2 077~2 081. Shao S J, Luo A Z, Yu Q G, *et al*. Structural damage properties of Q_3 loess under triaxial loading and moistening (In Chinese). Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2006, 28(12): 2 077~2 081
- [4] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋势. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 1~13. Xie D Y. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics (In Chinese). Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2001, 23(1): 1~13
- [5] 王永焱, 林在贵, 著. 中国黄土的结构特征及物理性质. 北京: 科学出版社, 1990. 127~129. Wang Y Y, Lin Z G, eds. Structural Characteristics and Physically Dynamics Properties of Chinese Loess (In Chinese). Beijing: Science Press, 1990. 127~129
- [6] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性. 中国科学, 1980, 23(12): 1 203~1 208. Gao G R. Microstructural classification and collapsibility of loess (In Chinese). Science in China 1980, 23(12): 1 203~1 208
- [7] Guo Y W, Suzuki S, Tanka M, *et al*. Micro structure and chemical composition of soil aggregates of a field in China Loess Highland (In Japanese). Reprinted from Journal of Agricultural Development Studies 2003, 14(1): 26~33
- [8] 郭玉文, 加藤诚, 宋菲, 等. 黄土高原黄土团粒及其碳酸钙关系的研究. 土壤学报, 2004, 41(3): 34~40. Guo Y W, Kato M, Song F, *et al*. Composition of loess aggregate and its relationship with $CaCO_3$ on the Loess Plateau (In Chinese). Acta Pedologica Sinica 2004, 41(3): 34~40
- [9] 甘肃省农业委员会, 甘肃省农业经济学会编. 甘肃中部台塬灌区的滑坡和湿陷治理. 甘肃农业专辑, 1995. Gansu Agriculture Committee, Gansu Agriculture Economy Academy, eds. The Coast and Collapse Hampering in Taiyuan Irrigation Area in Middle of Gansu (In Chinese). Gansu Agriculture Special Issue, 1995
- [10] Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Methods of Soil Analysis Part 3. Chemical Methods. SSSA, 1996. 456~457
- [11] 张梅英. 微束分析用于黄土湿陷机理的研究. 电子显微学报, 1996, 3: 229. Zhang M Y. Study on loess collapse mechanism by microbeam analysis (In Chinese). J. Chin. Electr. Microsc. 1996, 3: 229

BEHAVIORS OF $CaCO_3$ IN LOESS COLLAPSE CAUSED BY IRRIGATION

Guo Yuwen^{1,3} Zhang Yulong² Dang Xiuli² Kato Makoto³

(1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

(2 Land and Environment College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

(3 Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 183-0051, Japan)

Abstract The study on loess collapsibility has long ignored role of $CaCO_3$. With the aid of scanning electron microscope (SEM) and X-ray energy dispersive microanalysis (EDX or EDS), $CaCO_3$ distribution in loess was explored. Some indoor experiments were carried out to simulate loess collapse and study behaviors of $CaCO_3$ in the process. Results show that between loess particles exists plenty of $CaCO_3$, which is easily leached with irrigation water and lost in the process. Its loss through movement is much greater than through leaching and increasing with the percolation rate of irrigation water. Then $CaCO_3$ accumulates in the subsoil layer.

Key words Loess; Collapsibility; $CaCO_3$; Eluviation; Movement