

NANSHUIBEIDIAO ZHONGXIAN GONGCHENG  
TESHUXING YANTU DIZHI HUANJING YU  
HUANJING DIZHI GAILUN

# 南水北调中线工程 特殊性岩土地质环境与环境地质概论

杨计申 李德群 边建峰 闫宇 著



黄河水利出版社

# 南水北调中线工程特殊性岩土 地质环境与环境地质概论

杨计申 李德群 边建峰 闫宇 著

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

南水北调中线工程是一项举世瞩目的跨流域、长距离调水工程,勘测设计工作历时 20 余载,取得了丰硕的成果。本书主要针对南水北调中线工程中黄土类土、膨胀土这一特殊性岩土和采空区特殊地质条件,从地质环境与环境地质角度,阐述了工程勘察的技术思路和研究方向,旨在为解决具体的工程地质问题提供帮助。

本书可供从事水利水电工程地质、设计、科研和建设工作者阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

南水北调中线工程特殊性岩土地质环境与环境地质概论/杨计申等著. —郑州:黄河水利出版社,2009. 8

ISBN 978 - 7 - 80734 - 683 - 8

I. 南… II. 杨… III. ①南水北调 - 水利工程 - 岩土工程 - 工程地质 - 研究②南水北调 - 水利工程 - 环境地质学 - 研究 IV. TV68 P642. 42 X141

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 121800 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhsllwlp@126.com

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:10

字数:230 千字

印数:1—1 000

版次:2009 年 8 月第 1 版

印次:2009 年 8 月第 1 次印刷

---

定价:29.00 元

# 前 言

水利水电工程地质勘察,是水利水电工程设计和施工极为重要的基础工作,在工程建设活动中具有举足轻重的地位和作用。南水北调中线工程为一跨流域、长距离输水的大型水利工程,穿越不同类型的地质环境,设有桥、涵、闸、洞等众多交叉建筑物,不但增加了地质勘察工作的难度,而且对地质勘察工作的深度、精度提出了更高的要求。因此,如何运用适宜的地质勘察技术、理论和方法,在深化地质勘察工作深度和精度的同时,使地质环境评价的依据向定量化发展,成为工程地质师努力的方向。

为此,作者将南水北调中线工程遇到的黄土类土、膨胀土特殊性岩土和采空区特殊地质条件,利用已有的翔实地质勘察资料和作者调查成果,从分析岩土体的微结构入手,反演岩土体的成生环境,进而分析特殊性岩(土)体的物理力学特征,总结其工程特性,提出相应的地质工程建议等。依此,分析工程的地质环境,预测环境地质问题,评价地质工程的有效性。

在本书编写过程中,得到了长江水利委员会长江勘测规划设计研究院、河南省水利勘测总队、河北省水利水电勘测设计研究院及第二勘测设计研究院领导和专家的大力支持与帮助,得到了中水北方勘测设计研究有限责任公司勘察院领导和同事们的大力帮助,在此一并表示诚挚的谢意!

由于我们的水平所限,错误难免,敬请读者批评指正。

作 者

2009年5月

# 目 录

## 前 言

第 1 章 黄土类土渠道工程地质 .....	(1)
1.1 黄土类土分布及研究概况 .....	(1)
1.2 黄土类土工程地质特性 .....	(2)
1.3 黄土类土主要工程地质问题 .....	(34)
1.4 水在土体中的渗透理论 .....	(44)
1.5 黄土状土渠道工程土体加固 .....	(51)
第 2 章 膨胀土渠道工程地质 .....	(62)
2.1 概 述 .....	(62)
2.2 膨胀土的分布和成因类型 .....	(62)
2.3 膨胀土的物质组成 .....	(63)
2.4 膨胀土的矿物化学成分 .....	(67)
2.5 膨胀土结构特征 .....	(73)
2.6 膨胀土工程地质特性 .....	(78)
2.7 膨胀土试验与研究 .....	(99)
2.8 膨胀土土体结构特征研究 .....	(107)
2.9 膨胀土渠坡破坏形式研究 .....	(109)
2.10 膨胀土体物理力学参数取值分析 .....	(112)
2.11 膨胀土工程地质勘察 .....	(114)
2.12 膨胀土渠坡土体防护加固 .....	(116)
第 3 章 采空区地质环境与环境地质 .....	(135)
3.1 概 述 .....	(135)
3.2 煤炭系统对采空区稳定性评价 .....	(136)
3.3 铁路系统对采空区稳定性评价 .....	(137)
3.4 公路系统对采空区稳定性评价 .....	(137)
3.5 采空区建筑场地适宜性评价原则 .....	(138)
3.6 采空区水利工程适宜性评价 .....	(138)
3.7 采空区工程地质勘察 .....	(144)
3.8 采空区变形预防与加固处理 .....	(146)
第 4 章 结 语 .....	(149)
4.1 黄土类土 .....	(149)
4.2 膨胀土 .....	(149)
4.3 煤矿采空区 .....	(149)
参考文献 .....	(151)

# 第 1 章 黄土类土渠道工程地质

## 1.1 黄土类土分布及研究概况

黄土类土是在一定的自然地理作用下,由不同的物质来源,受不同的地质作用,分布在不同地貌单元上的多种成因类型的堆积物。主要分布在北纬  $30^{\circ} \sim 48^{\circ}$ ,尤以北纬  $34^{\circ} \sim 45^{\circ}$  最为发育;从下更新世( $Q_1$ )开始,其堆积过程直至今日仍未结束。

一般认为,黄土类土包括典型黄土和黄土状土。典型黄土又称原生黄土,以黄色或褐黄色的粉粒为主,富含碳酸钙且有大孔隙,垂直节理发育,具有浸湿后土体显著沉陷的特性——湿陷性;与之相似但缺少个别特性的土称之为黄土状土,是在原生黄土基础上,经过二次搬运堆积而成,故又可称为次生黄土。

黄土类土因其分布广、厚度大、成因复杂和性质特殊,而与工程建设活动关系密切。水利工程因地表水或地下水环境的客观存在,在与土的作用关系及其产生的结果上,地质环境与环境地质问题无疑是复杂和严重的,直接关系到水利工程的安全运行。

南水北调中线工程由南向北依次展布于伏牛山、嵩山、太行山山前地带或山地与平原之间的过渡带。该地带为黄土高原东部的外围区域,广泛分布来源于黄土高原的黄土状土。由于不同地段气候条件、距物源距离和搬运形式以及堆积环境的差异,不仅使黄土状土发育程度、堆积厚度有较大变化,而且物质组成、结构特征和工程特性等也有较大不同。

如黄河以南郑州附近的黄土状土,地貌特征上为黄土高原的东延部分,但在古土壤发育程度、黄土厚度和物质组成及结构特征等方面,有着显著区别于典型黄土的自身特点。黄河以北及其他黄土状土分布地段,在堆积成土过程中,由于地表水活动的参与,常有粗粒冲洪积物混杂其中,或相互成层或呈透镜状展布,在与其他第四系松散堆积物的接触关系、发育厚度等方面,也有着明显的区别。

尽管如此,由于黄土状土地段分布在我国北方干旱和半干旱气候区域内,气候、地表水等自然因素,对在此环境下形成的黄土状土影响程度相对较小,使其依然保存着典型黄土的大部分基本特性。但是,在过去相当长的时期内,人们对黄土状土的工程特性进行全面、系统的研究较少。有鉴于此,本书在黄土定名分类上,沿用黄土类土包括典型黄土和黄土状土的分类。但研究的重点内容为黄土状土,并与典型黄土统称为黄土类土。

前人对黄土类土渠道环境地质问题的研究成果表明,黄土类土的工程地质特性,控制着渠道工程的稳定性。因此,查明黄土类土的工程地质特性,是评价渠道工程稳定性、预测发生环境地质灾害的基础和前提。而对于非自重湿陷性黄土状土,研究其工程地质特性及其变化趋势,对于渠道的优化设计是非常重要的。同时,亦是土体加固工程设计的基础工作。

为南水北调中线工程的兴建,有关勘测设计和科研单位,对黄土类土开展了研究工

作。在此基础上,作者根据渠道工程对地基土体的要求,概括认为对黄土类土研究的主要内容,应包括湿陷性特别是自重湿陷性、土体强度特别是浸水后的强度变化、渗透性,以及影响和控制上述特性的物理状态、物质组成、物理化学性质和结构特征的研究,旨在对渠道工程地质环境进行有针对性评价,并预测渠道工程环境地质问题。

## 1.2 黄土类土工程地质特性

### 1.2.1 物质组成和物理化学特性

众所周知,土的物质组成决定着土体的物理力学性质。西北地区马兰黄土的黏粒含量一般小于10%,胶粒含量仅有6%左右,易溶盐含量却高达300~700 mg/100 g。在剖面上,虽然古土壤层黏粒含量可达12%以上,但由于裂隙发育而形成裂隙黏土体,其透水性相对较强,为局部地下水赋存提供了空间。黄土类土的物质组成则有较大变化,但均以粉粒为主。随着黏粒含量的增加,其黏聚力提高,渗透性减小,湿陷敏感性变弱且起始压力增大。

#### 1.2.1.1 黄土状土

黄河以北的黄土状土,0.1~0.01 mm粒级的极细砂和粗粉土颗粒,占全部颗粒组成的60%~80%,它们在土体中形成骨架结构;<0.005 mm黏粒含量一般可达14%~25%,古土壤中的黏粒含量则高达25%~40%,且主要为<0.002 mm的胶粒。近山麓堆积的黄土状土,>0.25 mm的粒级含量较高,局部还含有砂粒和细砾,一般具有层理,反映了黄土状土粗粒级组成的不均一性,这是黄土状土的一个典型特征。

影响土颗粒胶结程度的碳酸盐含量,与物质来源有关,一般为1.3%~2.7%,局部地段含量高达17.18%~53.82%。靠近石灰岩山区或丘陵区黄土状土,不仅碳酸盐含量高,还往往含有较多的碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )或石灰岩碎屑。

黄河以南黄土类土,主要分布在黄河岸边长约140 km的邙山—汝河一带,按成因可分为风成黄土、类黄土和次生黄土。在邙山区域,顶部普遍发育一层厚10~15 m的褐黄色松散粉质黄土;下伏厚0.5~0.8 m的黄褐色古土壤层。颗粒组成粗而均匀,<0.005 mm黏粒含量仅有10.1%,<0.002 mm胶粒含量为8.1%,碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )和蒙脱石含量分别为6.77%、6.58%。

与上更新世( $Q_3$ )黄土相比,化学成分有一定的变化。三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )含量仅有2.68%, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 的比值也仅为2.22;游离氧化物主要为三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )和三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),表明成土环境湿热化程度较低。黏粒中蒙脱石的含量比值相对较高,其总比表面积仅有81.24  $\text{m}^2/\text{g}$ ,阳离子交换量为13.21 meq/100 g,并且主要交换阳离子为钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ );土的pH值为8.56,呈弱碱性状态;易溶盐含量为0.15 g/100 g,属 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{—Ca}$ 型。

其下伏的古土壤层,在新开挖剖面上呈灰褐色或褐灰色,干燥后呈黄褐色。与黄土相比黏粒含量明显增高,<0.005 mm黏粒含量达16.5%,<0.002 mm的胶粒为14.5%。古土壤化作用,致使长石、云母等硅酸盐剩余含量仅有2.02%,而有机质含量增高至

0.99%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  的比值降至 2.05; 土粒比表面积增至  $111.47 \text{ m}^2/\text{g}$ , 物理化学活性增高, 亲水性增强; 易溶盐含量降至  $0.11 \text{ g}/100 \text{ g}$ , 主要化学成分为  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 。

### 1.2.1.2 马兰黄土

马兰黄土主要分布在黄河以南的邙山附近。其物质组成和物理化学性质具有典型的上更新世( $Q_3$ )马兰黄土特征, 在南水北调中线工程地段并不多见。其  $0.05 \sim 0.005 \text{ mm}$  粉粒含量较高, 尤其是  $0.05 \sim 0.01 \text{ mm}$  粗粉粒含量超过 50%, 最高达 60% 以上; 次要粒级为  $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$  极细砂, 含量一般为 25% ~ 35%;  $< 0.005 \text{ mm}$  黏粒含量仅有 8.5% ~ 16.7%, 大多在 11% ~ 15%;  $< 0.002 \text{ mm}$  胶粒含量一般为 9% ~ 13%。这与典型黄土的特征是一致的。

马兰黄土中富含碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ ), 含量一般为 7.5% ~ 12.0%, 最高可达 13.94%; pH 值为 8.60 ~ 9.12。一般认为, 碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )含量的增加, 有助于增强土体的固化作用。但因黏粒含量低, 土粒比表面积仅  $34.14 \sim 98.4 \text{ m}^2/\text{g}$ , 阳离子交换量最高为  $16.26 \text{ meq}/100 \text{ g}$ , 最低为  $11.61 \text{ meq}/100 \text{ g}$ , 且以钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )为主, 这就决定了马兰黄土物理化学活性低的特点。

马兰黄土带有棕色或褐色特征, 与普遍含有针铁矿物和游离氧化铁有关。三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )含量一般为 3.10% ~ 4.29%; 游离三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )可达 0.96% ~ 1.69%; 游离三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )含量与三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )含量相近, 多为 0.83% ~ 1.57%。黄土中的游离三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )和有机质及不定形碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ ), 共同构成了对黄土的胶结作用。

与全新世( $Q_4$ )黄土类土和古土壤相比, 马兰黄土有机质含量偏低, 一般为 0.3% ~ 0.5%, 最低仅 0.11%, 最高也只有 0.75%。由于大气降水或地表水的作用, 含盐量由黄河向北、向南都有大幅减少的趋势, 而邙山地段黄土的含盐量为  $113.89 \sim 193.95 \text{ mg}/100 \text{ g}$ , 反映了原生黄土高含盐量的基本特征。

马兰黄土中往往发育数层厚度一般小于 1 m 的古土壤层。在湿润气候下形成的古土壤层, 不仅改变了自身的物理化学性质, 同时也影响了下伏黄土的工程地质特性, 尤其是淋滤淀积钙质或钙质结核层的发育, 使黄土的力学强度提高而湿陷性减弱或消失, 这一特征在发育有古土壤层的剖面上显现的规律性尤为明显。

在古土壤层形成过程中, 碳酸钙大量淋失, 氧化亚铁( $\text{FeO}$ )减少, 导致黏粒含量相对增加。比表面积、阳离子交换量和游离三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )的增加, 促使古土壤物理化学活性和亲水性增强。三氧化二铁/氧化亚铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ )比值达 3.55 ~ 12.9, 且游离三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )含量的增高, 不仅使古土壤呈现褐色, 也促进了土壤中铁质胶结作用的增强。

古土壤中黏土收缩裂隙一般比较发育, 透水性相对较强, 局部还可能形成弱含水层。但其下伏的钙质富集或钙质结核层, 则是较好的相对隔水层, 使土体的渗透性在垂向上表现出较大差异。

### 1.2.1.3 离石黄土

离石黄土( $Q_2$ )在南水北调中线工程中仅分布在黄河以南邙山及其上、下游地带, 黄河以北和以南基本没有发育。



邛山附近的离石黄土与上覆马兰黄土的颗粒组成类似,粗粉粒含量多大于 50%, <0.005 mm 黏粒含量为 7.7% ~ 16.1%, <0.002 mm 胶粒含量在 6.1% ~ 14.1%,在剖面上黏粒含量自上而下有增加的趋势。

离石黄土土体富含碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ ),其含量最高达 15.06%;有效蒙脱石含量一般为 3.41% ~ 6.44%,但剖面底部的黄土可高达 10.61%;伊利石的含量往往相当于蒙脱石含量的 2/3。有机质含量与马兰黄土相近,一般小于 0.5%,最低仅有 0.18%。

化学分析成果显示,三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )的含量为 3.14% ~ 4.43%,氧化亚铁( $\text{FeO}$ )含量为 0.39% ~ 1.03%,三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )/氧化亚铁( $\text{FeO}$ )的比值(重量比)为 3.70 ~ 6.42;游离二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )含量为 0.45% ~ 1.11%,平均值为 0.74%;游离三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )含量为 0.65% ~ 1.44%,平均值为 1.17%;游离三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )含量为 0.92% ~ 1.83%,平均值为 1.27%;游离氧化铁占整体氧化铁含量的 30% 左右。从以上物质组成和化学成分分析看,离石黄土与上更新世( $Q_3$ )马兰黄土形成时的古气候环境是相似的。

离石黄土的 pH 值介于 8.7 ~ 9.02,略高于马兰黄土及其所夹古土壤的酸碱度。易溶盐的化学类型较多,主要有  $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Ca}$  和  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$  及  $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Mg}$  型。

土体矿物成分中,蒙脱石占主要成分,但因黏粒含量低,比表面积仅有 49.00 ~ 113.01  $\text{m}^2/\text{g}$ ,平均值为 86.04  $\text{m}^2/\text{g}$ 。阳离子交换量为 11.47 ~ 21.51 meq/100 g,平均值约为 15.95 meq/100 g。矿物成分中比表面积小和阳离子交换量低的特点,是造成离石黄土物理化学活性低的内在原因。因此,与马兰黄土相比,遇水后稳定性较好,仅局部地段可能会有微弱的非自重湿陷性。

离石黄土中的古土壤,<0.005 mm 黏粒含量相对较高,一般为 20.1% ~ 35.7%,其中 <0.002 mm 胶粒含量占 16.9% ~ 31.7%。按照颗粒组成划分,可定名为粉质黏土或黏土。

古土壤化作用,使土体中的长石、云母等硅酸盐矿物分解成黏土矿物,并发生红土化。在自然环境条件下,由于水解和淋滤作用,土体中的碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )被溶解、淋漓,在其下部淀积成钙质结核层。古土壤层中碳酸钙的大量流失,使其含量大多仅为 0.02% ~ 2.76%,远低于其上覆和下伏黄土中的含量。长石、云母和角闪石及辉石等硅酸盐矿物风化后分解为黏土矿物,与其上覆和下伏的黄土相比,蒙脱石和伊利石含量有显著增加:蒙脱石含量达 7.08% ~ 14.91%,平均值约为 10.31%;伊利石含量为 4.16% ~ 9.16%,平均值为 6.5%。这就使得古土壤的物理化学活性相对于黄土而言有明显的增强。古土壤中有机质含量亦高于黄土,一般为 0.10% ~ 0.44%。

古土壤的化学分析成果表明,氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )含量较高,大多为 3.80% ~ 5.83%,平均值为 4.61%;氧化亚铁( $\text{FeO}$ )含量则相对较少,多为 0.36% ~ 0.71%,平均值为 0.55%。在一定的物理化学环境作用下,硅酸盐矿物分解形成黏土矿物的同时,游离氧化铁和铝也在不断富集,最终形成红土化过程。

从土的力学特性讲,游离氧化铁的富集,增强了对黏土颗粒的胶结作用,力学强度增加。由于黏粒含量和蒙脱石矿物含量的提高,古土壤的比表面积和阳离子交换量亦有较

大的增加,实测土体比表面积大多为 96.36 ~ 204.85 m<sup>2</sup>/g,平均值为 128.11 m<sup>2</sup>/g;阳离子交换量为 18.82 ~ 36.86 meq/100 g,平均值为 26.45 meq/100 g。交换性阳离子以 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 为主,其中交换性 Mg<sup>2+</sup> 占了很大比例,致使古土壤化学活性增强。古土壤中易溶盐含量大多为 90.08 ~ 112.97 mg/100 g,与上覆下伏分布的黄土相近,主要易溶盐为 HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg·Na 或 HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg,其中 Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup> 离子含量相对黄土较高,土壤 pH 值也较高。

南水北调中线工程黄土类土矿物化学成分,详见表 1-1 ~ 表 1-5。

表 1-1 黄河以北段黄土类土矿物化学成分试验成果统计

岩性名称	地层时代	取样地点	CaCO <sub>3</sub> (%)	有机质 (%)	蒙脱石 (%)	伊利石 (%)	比表面积 (m <sup>2</sup> /g)
古土壤	Q <sub>4</sub>	磁县北西来村	1.40	0.40	11.21	5.64	105.34
			2.84	0.51	10.57	8.45	91.83
			1.31	0.32	13.02	9.52	113.33
古土壤	Q <sub>4</sub>	磁县双庙村	7.41	0.36	12.07	8.44	103.33
			8.18	0.69	17.29	12.81	150.8
			1.62	0.44	14.39	10.90	151.26
黄土状土			17.50	0.37	12.43	8.98	98.49
古土壤	Q <sub>4</sub>	磁县前稻田		0.58	14.24	7.83	113.07
				0.22	10.80	6.60	104.9
			1.14	0.39	10.53	7.88	95.27
			1.60	0.55	12.62	8.82	132.73
黄土状土			1.61	0.12	9.35	5.41	99.90
黄土状土	Q <sub>4</sub>	安阳市东梁村	2.81	0.35	10.89	4.94	108.50
			9.15	0.30	9.17	4.49	99.49
			8.92	0.31	9.21	6.81	97.13
			14.56	0.63	11.43	7.69	114.02
		安阳市西盖村	5.81	0.60	6.27	4.06	79.90
			4.76	0.12	8.17	3.74	89.95
			6.07	0.76	7.26	5.09	84.54
			5.07	0.57	8.92	4.21	89.57
			5.15	0.95	8.03	4.63	74.55
			5.46	1.22	6.26	3.39	76.29
			5.95	0.60	17.25	10.65	155.94

续表 1-1

岩性名称	地层时代	取样地点	CaCO <sub>3</sub> (%)	有机质 (%)	蒙脱石 (%)	伊利石 (%)	比表面积 (m <sup>2</sup> /g)
黄土状土	Q <sub>3</sub>	安阳市南张家村	2.01	0.61	8.76	4.45	88.97
			2.19	0.05	15.75	5.92	108.10
			1.77	0.76	15.57	6.53	141.85
古土壤	Q <sub>4</sub>	汤阴县张村	12.50	1.05	15.02	11.42	164.12
黄土状土			2.42	1.25	12.21	6.24	146.58
21.57			1.34	11.75	5.57	120.57	
古土壤	Q <sub>4</sub>	淇县前渔坡	1.63	0.60	10.71	8.55	136.23
黄土状土			1.95	0.61	10.21	8.62	145.27
			2.18	0.96	13.07	11.65	154.77
			1.87	1.16	11.17	9.40	133.13
古土壤	Q <sub>4</sub>	淇县相庄西	2.09	0.75	8.58	6.06	105.54
粉质黏土			4.70	0.79	11.80	6.18	94.12
			2.68	0.87	11.80		147.00
			2.69	0.54	13.52	11.81	141.66
古土壤	Q <sub>4</sub>	辉县南司马	2.27	0.68	13.03	10.34	138.24
黄土状土			3.76	0.43	9.86	7.72	121.77
			4.63	0.37	11.48	6.68	104.79
			1.83	0.39	11.34	11.69	101.50
古土壤	Q <sub>4</sub>	辉县路固南	1.81	0.27	13.66	7.54	125.00
黄土状土			1.63	0.45	13.30	10.50	133.13
			1.89	0.79	16.88	12.93	146.16
黄土状土	Q <sub>3</sub>		15.37	0.52	14.57	8.36	134.76

表 1-2 黄河以北段黄土类土矿物化学成分试验成果统计

岩性名称	地层时代	取样地点	CaCO <sub>3</sub> (%)	有机质 (%)	蒙脱石 (%)	伊利石 (%)	比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	pH 值	交换量 (meq/100 g)	交换阳离子组成 (meq/100 g)				盐基总量 (meq/100 g)
										Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
古土壤	Q <sub>4</sub>		1.97	0.36	8.04	7.06	118.59	7.78	16.00	12.10	2.57	0.37	0.72	15.70
			1.51	0.11	6.22	5.42	105.21	7.90	14.25	9.46	3.59	0.37	0.48	13.90
			1.51	0.17	6.92	5.05	94.77	7.85	13.14	10.34	1.76	0.37	0.48	12.95
			2.05	0.10	9.08	7.01	102.46	7.63	17.03	11.37	4.47	0.41	0.48	16.73
粉土	Q <sub>4</sub>			0.73	8.76	5.04	93.84							
			2.36	0.35	9.81	6.53	126.13	7.67	14.62	10.19	3.01	0.31	0.48	13.99
			1.29	0.22	11.94	10.55	166.65	7.56	20.82	15.32	3.81	0.51	0.48	20.12
			1.97	0.34	9.39	7.02	120.4	7.59	18.93	13.93	2.57	0.32	0.63	17.45
粉质黏土	Q <sub>3</sub>	易县孝村	2.00	0.14	9.67	6.66	110.95	7.86	19.00	10.93	5.94	0.42	0.62	17.91
			1.36	0.17	8.26	8.84	122.68	7.69	19.26	12.72	4.81	0.37	0.48	18.38
			2.07	0.75	7.04	6.62	115.62	7.62	18.96	13.07	4.97	0.35	0.46	18.85
			1.07	1.19	7.53	4.54	87.41	7.66	16.82	11.31	4.94	0.35	0.46	17.06
黄土状土	Q <sub>3</sub>	徐水县 孙各庄	2.27	0.34	5.68	4.82	85.61	7.52	16.03	10.34	4.69	0.35	0.46	15.84
			8.30	0.45	7.27	7.48	102.94	8.60	20.82	17.52	1.17	0.44	0.46	19.59
			11.22	0.18	7.35	5.50	80.99	8.74	17.03	14.62	0.66	0.33	0.46	16.12
			9.70	0.19	6.17	4.42	79.69	8.77	17.26	12.73	2.83	0.37	0.46	16.39

续表 1-2

岩性名称	地层时代	取样地点	CaCO <sub>3</sub> (%)	有机质 (%)	蒙脱石 (%)	伊利石 (%)	比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	pH 值	交换量 (meq/100 g)	交换阳离子组成 (meq/100 g)				盐基总量 (meq/100 g)	
										Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
全新世黄土	Q <sub>4</sub>		4.61	0.57	6.39	6.86	122.30	8.58	17.12	13.01	3.11	0.47	0.46	17.05	
古土壤	Q <sub>4</sub>	唐县 水泥厂	1.55	0.41	7.01	6.30	130.66	8.22	18.96	14.21	3.68	0.47	0.68	19.04	
			2.59	0.25	7.08	6.09	137.19	8.02	17.62	12.73	3.89	0.47	0.47	17.56	
黄土状土	Q <sub>3</sub>		2.18	0.20	5.63	7.60	138.30	7.41	14.71	11.94	1.70	0.37	0.48	14.49	
			1.33	0.20	6.17	6.79	126.20	7.72	17.51	12.37	4.24	0.32	0.48	17.41	
黄土状土	Q <sub>3</sub>	唐县 高昌庄	1.98	0.23	7.08	5.86	91.33								
			1.93	0.75	8.48		122.65								
			6.75	0.37	7.72	5.25	93.28								
			8.24	0.47	14.07	5.12	121.06								
			4.98	0.16	13.35	6.57	176.06								

表 1-3 黄河以北段黄土类土化学成分试验成果统计

岩性名称	地层时代	取样地点	pH 值	含盐量 (mg/100 g)	阳离子										阴离子					
					Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Cl <sup>-</sup>	
					毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)
古土壤	Q <sub>4</sub>		6.9	56.9	6.00	41.67	2.60	29.17	4.08	25.00	1.08	4.17	41.00	84.81				2.13	15.19	
					6.57	43.42	3.64	39.47	2.52	14.47	0.83	2.63	30.21	67.12	1.06	5.48				6.97
黄色粉土	Q <sub>3</sub>	易县 中罗村	6.9	71.08	13.71	65.14	2.42	21.20	2.67	11.01	1.08	2.75	43.17	74.73	1.06	4.21		6.97	21.05	
					12.86	58.18	3.46	26.36	3.12	12.73	1.33	2.73	43.17	74.74						8.37
粉土	Q <sub>4</sub>		8.1	59.12	11.43	72.15	1.04	11.39	2.37	12.66	1.25	3.80	38.85	84.21				4.18	15.79	
					8.57	47.78	1.73	20.00	6.16	30.00	0.83	2.22	43.17	78.02						6.97
粉质土	Q <sub>3</sub>	易县	7.0	76.89	18.57	78.81	0.35	2.54	4.23	15.25	1.66	3.39	28.06	45.54			17.05	34.65	6.97	19.80
					7.41	58.73	1.73	22.22	2.00	14.29	1.33	4.76	23.74	66.10						6.97
		孝村	6.9	42.19	5.42	50.94	0.69	11.32	3.12	26.42	2.49	11.32	26.98	81.48					3.49	18.52
					6.43	40.51	3.90	40.51	2.37	12.66	2.08	6.33	19.43	39.02			16.33	41.46	5.58	19.51
古土壤	Q <sub>4</sub>		8.2	213.44	44.28	80.36	1.73	5.09	8.90	14.18	0.58	0.36	115.4	65.40	3.54	4.15	30.50	22.15	8.51	8.30
					10.02	59.52	3.29	32.14	1.45	7.14	0.58	1.19	30.22	54.95			7.18	16.48	9.07	28.57
黄土状土	Q <sub>3</sub>	徐水县 孙各庄	6.9	102.77	26.14	82.39	2.08	10.69	2.23	4.29	0.58	0.63	45.23	53.24			12.56	18.71	13.95	28.06
					65.29	74.83	2.92	16.78	2.37	6.99	0.66	1.40	64.76	77.37	2.13	5.11				8.37
亚黏土	Q <sub>3</sub>		8.4	97.61	21.43	71.81	3.98	22.15	1.74	5.37	0.42	0.67	53.96	65.67	2.13	5.22			13.95	29.10
					22.85	67.06	5.37	21.18	4.23	10.59	0.91	1.18	84.18	77.97						13.95

续表 1-3

岩性名称	地层时代	取样地点	pH 值	含盐量 (mg/100 g)	阳离子						阴离子									
					Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Cl <sup>-</sup>	
					毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)	毫克/100 g	毫克当量 (%)
黄土			7.2	83.07	17.86	74.17	6.93	22.50	0.58	2.50	0.83	43.17	64.55					13.95	35.45	
古土壤	Q <sub>4</sub>	唐县	6.9	43.86	10.00	80.64	1.04	14.52	0.48	3.23	1.64	30.22	86.21					2.79	13.79	
		水泥厂	7.0	38.33	8.57	84.13			2.00	16.98	0.58	26.60	68.63					5.58	31.37	
黄土	Q <sub>3</sub>		7.2	63.84	8.28	42.71	4.14	35.42	3.71	16.67	1.83	26.98	45.83			1.44	3.13	17.44	51.04	
状土			6.9	60.87	7.14	40.45	2.77	25.84	5.71	28.09	1.81	29.29	57.83			7.18	18.07	6.97	24.10	
			7.0	97.74	22.28	78.17	1.73	9.86	3.12	9.86	1.00	47.49	61.42			17.94	29.13	4.18	9.45	
黄土	Q <sub>3</sub>	唐县	7.5	47.71	10.00	72.46			3.12	20.29	2.08	23.74	59.09			1.80	6.06	6.97	34.85	
状土		高昌庄	7.5	115.09	19.43	63.40	3.89	20.92	4.23	11.76	2.16	75.55	80.52	4.25	9.09			5.58	10.39	
			7.3	134.71	24.28	72.46	2.55	12.57	4.60	11.98	2.08	97.02	92.98					4.18	7.02	
			8.0	91.35	17.43	52.78	3.46	26.85	3.93	15.74	1.91	60.44	89.19					4.18	10.80	
			8.1	159.33	27.43	57.56	8.31	28.57	7.05	13.03	0.66	71.23	54.52			37.68	36.28	6.97	9.30	
古土壤	Q <sub>4</sub>	磁县	8.1	104.01	18.86	62.67	4.50	24.67	3.56	10.00	1.41	53.96	63.77			16.15	24.64	5.57	11.50	
		北西来	7.8	110.80	21.43	71.81	2.6	14.09	4.23	12.08	1.33	75.55	87.32			0.90	1.41	5.57	11.27	
			8.1	113.6	22.86	69.51	3.46	17.68	3.93	10.37	1.58	64.76	71.14	1.06		8.97	12.75	6.98	13.42	
古土壤	Q <sub>4</sub>	磁县	7.6	146.5	27.14	69.18	4.68	19.19	5.19	11.11	1.33	64.76	52.22	0.53		35.89	36.95	6.98	9.85	
		双庙村	7.5	129.10	25.71	71.11	3.98	18.33	3.78	8.89	0.83	79.86	79.39			10.76	13.33	4.18	7.27	
黄土	Q <sub>3</sub>		7.6	137.77	27.14	67.50	6.06	25.00	2.74	6.00	1.33	73.70	67.22			23.33	27.22	3.47	5.56	
状土																				

续表 1-3

岩性名称	地层时代	取样地点	pH值	含盐量 (mg/100g)	阳离子						阴离子									
					Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Cl <sup>-</sup>	
					mg/ 100g	毫克 当量 (%)	mg/ 100g	毫克 当量 (%)	mg/ 100g	毫克 当量 (%)	mg/ 100g	毫克 当量 (%)	mg/ 100g	毫克 当量 (%)	mg/ 100g	毫克 当量 (%)	mg/ 100g	毫克 当量 (%)	mg/ 100g	毫克 当量 (%)
古土壤	Q <sub>4</sub>	磁县 前稻田	7.2	124.76	27.43	77.40	2.60	11.86	3.12	7.91	1.91	2.82	75.55	77.99			7.18	9.43	6.97	12.58
			7.5	114.84	24.85	75.61	2.60	12.80	3.56	9.15	1.66	2.44	60.44	66.44			16.15	22.82	5.58	10.34
			7.2	104.18	26.86	80.85	1.73	9.93	2.30	7.09	1.08	2.13	65.23	84.25					6.98	15.75
			7.4	92.24	20.00	75.19	1.73	10.53	3.78	12.03	1.00	2.26	51.80	68.55					13.93	31.45
黄土 状土	Q <sub>3</sub>		7.4	99.64	21.41	76.98	1.82	10.79	3.12	10.07	1.08	2.16	65.23	84.25			6.98	15.75		
黄土 状土	Q <sub>4</sub>	安阳市 东梁村	7.2	93.48	21.43	81.68	1.30	8.40	2.37	7.63	1.16	2.29	53.96	72.73			6.28	10.74	6.98	16.53
			7.1	85.22	19.71	80.99	1.73	11.57	1.26	4.13	1.58	3.31	53.96	81.48					6.98	18.52
			6.9	97.97	21.43	79.85	1.73	10.45	2.00	6.72	1.74	2.99	56.12	73.02			10.77	17.46	4.18	9.52
			6.9	90.25	19.71	79.03	1.73	11.29	2.00	7.26	1.16	2.42	58.28	82.76			1.80	3.45	5.57	13.79
黄土 状土	Q <sub>3</sub>	安阳市 西盖村	7.5	71.51	15.25	79.44	1.17	10.02	1.66	7.52	1.13	3.02	44.97	79.68			2.54	5.73	4.79	14.59
			7.6	72.65	15.21	78.90	1.07	9.15	1.91	8.63	1.25	3.32	46.07	80.49			2.50	5.54	4.64	13.97
			8.0	82.25	15.49	71.84	1.67	12.73	2.35	9.48	2.50	5.95	50.64	75.87	2.31	7.04	2.50	4.25	4.79	12.34
			7.8	75.41	14.83	75.82	0.94	7.89	2.35	10.45	2.22	5.84	47.23	79.47			2.88	6.16	4.96	14.37
			8.0	83.97	15.91	70.77	2.09	15.33	2.19	8.47	2.38	5.43	50.77	74.35	2.31	6.88	3.36	6.26	4.96	12.51
			7.9	76.82	15.29	74.15	1.67	13.31	1.89	7.97	1.83	4.57	47.23	77.32			4.12	9.19	4.79	13.49
			7.8	81.87	15.09	73.60	1.80	13.57	2.19	18.71	1.76	4.12	53.15	82.87			1.92	3.81	4.96	13.32



续表 1-3

岩性 名称	地层 时代	取样 地点	pH 值	含盐量 (mg/100g)	阳离子						阴离子									
					Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Cl <sup>-</sup>	
					毫克/ 100 g	毫克/ 当量 (%)	毫克/ 100 g	毫克/ 当量 (%)	毫克/ 100 g	毫克/ 当量 (%)	毫克/ 100 g	毫克/ 当量 (%)	毫克/ 100 g	毫克/ 当量 (%)	毫克/ 100 g	毫克/ 当量 (%)	毫克/ 100 g	毫克/ 当量 (%)	毫克/ 100 g	毫克/ 当量 (%)
黄土 状土	Q <sub>3</sub>	安阳 南张家	7.4	35.65	5.99	60.53	1.36	22.67	1.17	10.32	1.25	6.48	17.7	58.23			3.07	12.85	5.11	28.92
			7.3	50.08	8.96	63.86	1.63	19.14	2.05	12.71	1.17	4.29	26.06	62.79			4.71	14.41	5.50	22.88
			7.1	39.59	7.04	64.40	1.11	16.70	1.77	14.13	1.01	4.77	21.84	67.04			2.21	8.61	4.61	24.35
古土壤 黄土 状土 粉土	Q <sub>4</sub>	汤阴县 张村	7.9	93.02	20.44	85.79	0.64	4.46	2.31	8.07	0.78	1.68	61.45	83.99			2.26	3.92	5.14	12.09
			7.8	76.46	18.18	84.93	0.55	4.21	2.31	8.99	0.78	1.87	43.32	71.00			3.94	8.20	7.38	20.80
			8.0	81.16	17.96	80.50	0.85	6.29	2.85	11.14	0.90	2.07	48.45	74.14	2.31	7.19	2.88	5.50	4.96	13.07
古土壤	Q <sub>4</sub>	淇县 前渔坡	7.7	72.42	9.42	61.92	1.61	17.39	2.99	17.13	1.05	3.56	30.94	68.05			4.32	5.37	7.02	26.58
			7.8	71.62	12.83	63.3	3.16	25.72	1.40	6.03	1.95	4.95	41.37	71.22			4.56	9.98	6.35	19.80
			7.4	63.92	6.47	42.61	4.15	44.99	1.10	6.33	1.79	6.07	26.61	62.64			4.08	12.21	6.21	25.15
古土壤 黄土 状土	Q <sub>3</sub>		7.2	59.33	8.04	60.57	1.58	19.64	1.66	10.88	2.30	8.91	20.69	53.39			3.79	12.44	7.69	39.17
			7.4	56.05	8.12	50.88	3.28	33.92	1.38	7.54	2.38	7.66	30.14	64.61			4.08	11.08	6.67	24.51