

中国水蚀土壤抗剪强度研究

张爱国, 李锐, 杨勤科

(中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用野外测试数据、土壤样品的室内理化分析数据和参考文献数据, 对水蚀区范围内水土流失过程中的土壤抗剪强度进行了初步研究, 建立了中国水土流失土壤抗剪强度的回归模型。总结出水蚀区范围内水蚀过程中有关土壤抗剪强度的 3 条结论: 影响水土流失过程中土壤抗剪强度的主导因素是容重、粉/黏、土壤含水量、土壤有机质含量; 抗剪强度随土壤类型发生有规律的变化; 抗剪强度在中国水蚀区范围内有较明显的空间分异规律(包括水平分异规律和垂直剖面构型规律)。

关键词: 测试数据; 抗剪强度; 回归模型; 空间分异

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2001)03-0005-05

中图分类号: S157.1

Study on Soil Anti-shearing Intensity of Water Erosion in China

ZHANG Aiguo, LI Rui, YANG Qinke

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, PRC)

Abstract: Soil anti-shearing intensity in water erosion process of the whole country is preliminarily researched in the article by using the firsthand data obtained through field test, indoor analytic data of the physical and chemical properties of soil samples and reference data. The regression model of soil anti-shearing intensity is built. The dominate factors impacting on soil anti-shearing intensity in regional water erosion process are soil capacity, ratio of silt to clay, the water content and organic matter content. Soil anti-shearing intensity regularly changes keeping pace with the soil type, it has obvious space distribution rules in Chinese water erosion region, including horizontal and vertical distribution rules.

Keywords: test data; anti-shearing intensity; regression model; space distribution difference

1 前言

目前国内关于土壤抗剪强度的研究现状, 一是成果不多, 数据很少; 二是侧重于坡面尺度、小流域和局部区域(以黄土高原为主^[1-4]) 研究; 三是观点上分歧大(例如, 在土壤抗剪强度是属于抗冲性指标还是抗蚀性指标上存在分歧)、测试方法不一。这种现状造成了全国性的宏观研究尤其是数据分析上的困境, 很难从已有的研究成果中总结出全国尺度上水蚀过程中土壤抗剪性能的有关结论。“中国水蚀土壤抗剪强度研究”是“中国水土流失土壤因子宏观研究”的组成部分之一, 是按照水利部水土保持监测中心“全国水土流失动态监测实施方案”的计划要求, 主要是考虑到建立全国水蚀预报模型的需要而进行的。

从土壤力学上看, 土壤水蚀是雨滴对土粒的溅击剪切作用和径流对土粒的冲刷剪切作用的过程综合, 所以土壤的抗剪强度是区域水土流失评价中反映土壤力学特性的重要指标之一; 近年来, 我国水土流失的治理已由小流域转向较大区域的集中连片治理, 作为水土保持基础的土壤侵蚀研究日益关注区域和全国尺度上的宏观研究, 在土壤侵蚀宏观研究中, 土壤作为被侵蚀的对象, 是影响土壤侵蚀量和流失量的因子之一, 而土壤抗剪强度是最能体现出区域水土流失过程中土壤抵抗径流冲刷剪切能力的“指示指标”之一, 所以进行水土流失土壤抗剪强度规律的研究, 对于区域和全国水土流失整治的宏观决策(如防止重力侵蚀、增加斜坡稳定性)十分重要, 尤其是研究天然含水量状态下的原状土抗剪强度, 对于基本农田建设中

收稿日期: 2001-04-09

资助项目: 中国科学院知识创新项目“中国水土流失宏观分析与评价研究”(99-01-05); 水利部水利科技开发基金项目“中国水土流失快速清查技术研究”(SJ-9725)

作者简介: 张爱国(1966-), 男(汉族), 陕西洛南人, 副教授, 中国科学院水利部水土保持研究所在读博士生。主要从事水土流失土壤因子和地理信息系统研究。电话(029)7010502, E-mail: Aiguo@public.xa.sn.cn

校核梯田边坡的稳定性、确定梯埂边坡设计坡度以防止水土流失更为重要。

根据 2000 年夏季对中国水蚀区中 35 个测试点的土壤抗剪强度(以及与土壤抗剪强度有关的土壤含水量、容重、测点位置等特征)野外现场测试的第一手资料、测点土壤样品的室内理化属性分析数据,并参考前人用相同测试方法和测试设备获得的研究成果^[1],本文将对全国水蚀区范围内的浅层原状土抗剪强度规律进行初步分析。

2 数据基础

本文分析用的数据包括 3 类:(1)靠野外测试获取的原始数据;(2)测点土壤样品的室内理化属性分析数据;(3)利用在黄土高原地区用相同测试方法和测试设备获得的文献数据。

2.1 野外测试数据

基于“中国水土流失宏观分析与评价研究”课题

的需要,“中国水土流失土壤因子野外测试小组”在 2000 年夏季对中国水土流失土壤因子进行了为期 3 个月的野外测试,其中包括对土壤抗剪强度的测试。此次野外测试采用原状土抗剪强度这一指标反映土壤的抗剪性能,水蚀作用下的原状土抗剪强度是指在雨滴溅击或径流冲刷作用下,土粒发生相对滑动时所具有的抵抗溅击或冲刷剪切作用的极限强度,量纲为 kg/cm^2 ;对于抗剪强度的测试,目前有原状土抗剪测定法与击实土抗剪测定法不同^[1],野外原位水平挤出法、三轴仪、直剪仪、大型野外剪切箱测定、抗剪切力仪法等的不同^[2],这次野外测试采用浅层原状土抗剪切力仪法,分 3 层测定(上层 0—10 cm,中层 20—30 cm,下层 40—50 cm),测试统一取 3 次重复;测试的主要设备是 14.10 型三头抗剪仪(14.10 Pocket Vane Tester);测试点 35 个,测试涉及土壤亚类 27 个(表 1)。通过对野外测试原始数据的统计,可得到表 2 中的土壤抗剪强度分层统计数据。

表 1 土壤抗剪强度野外测试点及相应的土壤亚类

测试点	土壤亚类	测试点	土壤亚类	测试点	土壤亚类	测试点	土壤亚类
北京门头沟	山地棕壤	河北承德	淋溶褐土	湖南长沙	黄红壤	贵州贵阳	黄壤性土
黑龙江哈尔滨	薄层黑土	河北张北	栗钙土	江西南昌	红壤	贵州遵义	黄壤
黑龙江阿城	薄层黑土	河北石家庄	石灰性褐土	江西兴国	红壤	重庆渝北	酸性紫色土
黑龙江拜泉	薄层黑土	河北武安	褐土性土	广东广州	赤红壤	重庆荣昌	中性紫色土
黑龙江讷河	暗棕壤	山东济南	棕壤	广东湛江	砖红壤	四川自贡	中性紫色土
吉林白城	黑钙土	河南信阳	黄棕壤	广西南宁	紫色土	四川成都	中性紫色
吉林农安	黑钙土	湖北武汉	黄棕壤	广西百色	褐红壤	四川梓潼	石灰性紫色土
辽宁沈阳	棕壤	湖北宜昌	黄壤	云南罗平	黑色石灰土	陕西留坝	黄棕壤
辽宁阜新	碳酸盐褐土	湖南慈利	紫色土	云南宜良	山原红壤		

表 2 测点抗剪强度值的分层统计

测试点	抗剪强度														
	层 1	层 2	层 3		层 1	层 2	层 3		层 1	层 2	层 3		层 1	层 2	层 3
京 1	0.29	0.15	0.24	冀 1	0.06	0.09	0.10	湘 2	0.44	0.49	1.48	黔 1	0.12	0.12	0.13
辽 1	0.04	0.62	0.47	冀 2	0.52	0.55	0.50	赣 1	1.26	1.42	1.44	黔 2	0.17	0.17	0.17
吉 1	0.24	0.28	0.36	冀 3	0.58	0.57	0.55	赣 2	1.38	1.49	1.52	渝 1	0.15	0.16	0.14
黑 1	0.39	0.24	0.29	冀 4	0.49	0.54	0.5	粤 1	0.62	0.62	0.61	渝 2	0.16	0.14	0.12
黑 2	0.37	0.41	0.36	鲁 1	0.42	0.56	0.53	粤 2	1.51	1.48	1.51	川 1	0.15	0.14	0.14
黑 3	0.09	0.08	0.09	豫 1	0.5	0.52	0.56	桂 1	0.56	0.66	0.69	川 2	0.72	0.65	0.58
黑 4	0.09	0.09	0.10	鄂 1	0.54	0.59	0.58	桂 2	1.68	1.63	1.68	川 3	0.69	0.65	0.61
吉 2	0.09	0.13	0.13	鄂 2	0.58	0.62	0.59	滇 1	1.55	1.55	1.45	秦 1	0.61	0.64	0.56
辽 2	0.57	0.48	0.55	湘 1	0.61	0.56	0.62	滇 2	1.51	1.84	1.46				

除了测试土壤抗剪强度外,还在野外测试了与土壤抗剪强度属性和分布有关的土壤含水量、容重、测点位置等 3 个指标,其数据见表 3(土壤容重、含水量的测试采用环刀法,测点定位采用了单台静态 GPS 定位法)。

2.2 土壤样品的室内理化属性分析数据

为了分析影响土壤抗剪强度的主要因素,我们选用粉/黏(主要反映土壤质地这一物理属性)、有机质含量(主要反映土壤生物属性)、pH 值、阳离子交换量、盐基饱和度(主要反映土壤化学属性)、容重和含

水量(主要反映土壤结构等物理特性)等 7 个项目作为测点土壤属性指标方面的抗剪强度主要影响因素,为了分析数据的统一,我们仅取用测点剖面 0—10cm 深度范围内的土壤属性指标值。

在测点 7 个土壤属性指标值中,容重和含水量的

数据已在野外测出,其余 5 个土壤属性指标值,通过对野外采集的原状土样进行室内理化分析来获得。数据由中国科学院水利部水土保持研究所土壤水分实验室、化学实验室分别测试后再经过统计而获取,见表 4。

表 3 测点定位指标、容重和含水量的统计数据

行政区位	测点定位			容重/ $(g \cdot cm^{-3})$	含水量/ %	行政区位	测点定位			容重/ $(g \cdot cm^{-3})$	含水量/ %
	经度/ $^{\circ}E$	纬度/ $^{\circ}N$	高度/m				经度/ $^{\circ}E$	纬度/ $^{\circ}N$	高度/m		
北京门头沟区	116.05	39.97	1000	1.27	15.39	湖南乡宁县	112.30	28.10	104	1.32	17.12
辽宁省沈阳市	123.42	41.83	100	1.54	13.49	江西新建县	115.86	28.82	27	1.25	24.69
吉林省农安县	125.10	44.01	201	1.45	20.15	江西兴国县	115.30	26.24	184	1.65	17.70
黑龙江省哈尔滨市	126.58	45.93	210	1.60	15.55	广东广州市	113.37	23.28	77	1.50	31.96
黑龙江省阿城市	126.97	45.55	260	1.43	22.43	广东湛江市	110.44	21.38	30	1.72	16.34
黑龙江省拜泉市	126.10	47.75	200	1.39	25.45	广西邕宁县	108.64	22.73	104	1.51	13.65
黑龙江省讷河市	124.87	48.53	240	1.55	23.90	广西百色市	106.60	23.98	192	1.62	14.99
吉林省白城市	122.85	45.63	200	1.50	14.83	云南罗平县	104.37	24.8	1549	1.33	32.24
辽宁省阜新市	121.90	42.33	201	1.59	14.30	云南宜良县	103.06	24.86	1882	1.42	24.50
河北省承德市	117.97	40.99	420	1.39	9.87	贵州贵阳市	106.70	26.34	1016	1.29	25.09
河北省张北县	114.55	41.03	1400	1.49	16.08	贵州遵义市	106.84	27.6	900	1.35	29.12
河北省石家庄市	114.47	38.02	62	1.67	20.24	重庆渝北区	106.52	29.64	404	1.68	18.67
河北省武安市	114.10	36.68	1100	1.57	23.70	重庆荣昌县	105.50	29.40	414	1.63	22.53
山东济南市	117.03	36.70	50	1.46	16.91	四川自贡市	104.73	29.35	365	1.47	26.42
河南信阳市	114.05	31.90	700	1.57	20.03	四川成都市	104.34	30.65	584	1.77	17.14
湖北武汉黄陂县	114.27	31.32	143	1.68	11.96	四川梓潼县	105.07	31.57	479	1.38	16.85
湖北宜昌市	118.34	30.84	322	1.65	23.12	陕西留坝县	106.90	33.64	1002	1.50	20.36
湖南慈利县	110.96	29.60	150	1.99	13.61						

表 4 测点土样的室内理化分析数据

测试点	粉/黏/ %	有机质 含量/%	pH 值 (H_2O)	阳离子交换量 $cmol(+)/kg$	盐基饱 和度/%	测试点	粉/黏/ %	有机质 含量/%	pH 值 (H_2O)	阳离子交换量 $cmol(+)/kg$	盐基饱 和度/%
京 1	4.34	2.11	8.11	20.50	90.20	湘 2	1.65	2.07	5.70	2.93	41.90
辽 1	1.65	5.90	6.10	22.40	81.00	赣 1	1.43	2.89	6.54	5.98	97.30
吉 1	2.31	3.11	6.40	23.40	72.40	赣 2	0.98	0.87	6.90	8.76	93.20
黑 1	1.34	3.43	6.10	20.20	43.10	粤 1	0.87	2.25	5.60	2.77	22.80
黑 2	2.31	3.30	6.20	20.30	42.30	粤 2	1.02	2.21	6.30	1.31	39.60
黑 3	2.10	3.51	5.50	30.30	55.30	桂 1	1.43	2.28	4.60	1.42	56.40
黑 4	3.45	4.34	6.32	43.00	62.10	桂 2	1.23	3.66	6.90	24.70	39.20
吉 2	1.21	1.60	7.30	26.70	78.40	滇 1	1.54	2.65	6.10	6.87	29.60
辽 2	3.24	2.50	6.20	30.50	80.10	滇 2	1.08	2.38	7.00	6.90	72.20
冀 1	2.50	4.20	6.84	34.20	75.30	黔 1	2.35	4.55	4.10	0.66	12.70
冀 2	4.31	1.89	7.23	42.10	62.10	黔 2	1.98	1.96	4.20	2.23	17.60
冀 3	1.24	4.53	7.42	41.70	56.70	渝 1	1.21	2.67	5.21	4.47	66.30
冀 4	1.45	3.54	7.63	46.70	61.20	渝 2	1.54	2.06	7.20	11.70	60.40
鲁 1	3.27	6.80	8.20	15.70	98.40	川 1	0.76	1.73	7.30	26.10	52.10
豫 1	1.44	2.53	5.80	17.50	96.00	川 2	0.98	2.01	7.21	21.30	54.10
鄂 1	1.53	2.31	6.04	12.50	53.20	川 3	0.87	1.18	8.00	18.70	51.40
鄂 2	2.33	1.49	6.40	6.54	58.40	秦 1	1.38	2.12	4.90	7.98	65.10
湘 1	2.13	1.98	6.03	8.54	52.10						

2.3 文献数据的收集

从文献^[1]中获取的黄土高原地区的土壤抗剪强

度值(用相同测试方法和测试设备获得的,0—10cm)见表 5。

表 5 抗剪强度的文献数据

测点区位	K	测点区位	K	测点区位	K
甘肃天水	0.26	陕西宜川	0.72	内蒙古清水河	0.84
甘肃庆阳	0.25	陕西白水	0.64	内蒙古准格尔	0.78
陕西榆林	0.86	宁夏固原	0.61	内蒙古东胜	0.97
陕西定边	1.03	宁夏海原	0.72	山西河曲	1.21
陕西永寿	1.55	宁夏西吉	0.75	山西离石	0.67
陕西陇县	0.98	宁夏盐池	0.89	山西吉县	0.68

注:表中 K 为抗剪强度。

3 土壤抗剪强度回归模型建立与应用

为了在土壤属性指标值与抗剪强度之间建立回归关系,我们利用表 2—5 中的数据,应用 SPSS(10.0 专业版)统计软件在 WINDOWS.2000 操作平台上进行非线性多元逐步回归分析,最终建立的土壤抗剪强

度回归模型是:

$$K_j = 2.46 - 3.32x_1 + 11.54x_2^2 - 0.65x_3 + 0.23x_4$$

$$(R^2 = 0.823, \alpha = 0.05)$$

式中: K_j —— 抗剪强度; x_1 —— 粉/黏; x_2 —— 容重; x_3 —— 土壤含水量; x_4 —— 有机质含量。

我们通过计算模型理论值与其对应的实测值之间的相对误差对上述抗剪强度回归模型进行了统计验证(略)。

为了获得未测点的土壤抗剪强度值,有必要在全国范围内选择一些代表性地点作为预测对象。经过认真选择后选用了全国范围内 98 个点作为预测的对象。通过查阅大量的文献资料^[6-11],获得预测点的容重、粉/黏、土壤含水量、有机质含量数据;将这些数据代入回归模型之中,计算出来的预测数据见表 6。

表 6 抗剪强度的预测数据

预测点	抗剪强度	预测点	抗剪强度	预测点	抗剪强度	预测点	抗剪强度
北京昌平	1.12	广东阳山	0.68	江西宜春	0.36	吉林德惠	0.21
福建宁化	0.97	广东南雄	0.78	江西赣州	0.92	黑龙江宝清	1.12
福建南平	0.59	广东惠阳	1.14	浙江杭州	0.79	黑龙江巴彦	0.09
福建漳平	0.67	广东翁源	0.54	浙江临海	0.79	黑龙江突县	0.24
福建华安	0.96	海南东方	0.81	浙江奉化	0.57	黑龙江漠河	0.32
福建诏安	0.80	海南白沙	0.36	安徽歙县	0.44	甘肃肃南	0.35
福建漳浦	0.92	海南琼山	1.19	安徽蚌埠	1.21	甘肃广河	0.37
福建平和	0.64	海南保亭	0.99	安徽岳西	0.57	甘肃皋兰	0.52
福建德化	0.17	湖南邵阳	0.05	安徽泾县	0.55	青海曲麻莱	0.80
云南昭通	0.39	湖南麻阳	0.13	安徽宁国	0.65	青海久治	0.29
云南哈尼	0.64	湖南益阳	0.74	江苏铜山	0.31	青海治多	0.78
云南元谋	0.77	湖南湘潭	0.39	江苏无锡	0.48	青海祁连	0.48
云南景洪	0.09	湖南资兴	0.67	江苏射阳	0.61	青海兴海	0.58
云南瑞丽	0.63	湖北黄梅	0.77	上海松江	0.36	青海玛多	0.52
云南宣威	0.51	湖北通山	0.21	山东邹县	0.21	青海泽库	0.75
贵州水城	0.18	湖北来凤	0.37	山东泰安	0.37	西藏江达	0.82
贵州平坝	0.31	湖北长阳	0.69	河南伊川	0.41	西藏察隅	0.86
四川攀枝花	1.12	湖北远安	0.79	河南南阳	0.22	西藏朗县	0.70
四川名山	1.13	湖北应城	0.16	河南延津	1.01	西藏拉萨	0.59
四川万县	1.24	江西德兴	0.71	河南新蔡	0.31	西藏昌都	0.15
广西桂林	0.53	江西泰和	0.86	辽宁朝阳	0.26	新疆吐鲁番	0.95
广西马山	0.71	江西庐山	0.41	辽宁宽甸	1.16	新疆木垒	0.40
广西贺县	0.62	江西资溪	0.85	辽宁清原	1.26	陕西南郑	0.86
广西钦州	1.18	江西宜黄	0.92	吉林通化	1.35		
广西兴安	0.68	江西萍乡	0.50	吉林安图	1.37		

4 主要结论

4.1 影响区域水蚀过程中土壤抗剪强度的主导因素

上述水蚀土壤抗剪强度回归模型的相关系数值和标准化回归系数值表明:土壤抗剪强度主要受容重、粉/黏、土壤含水量和有机质含量等 4 个因子制约。有关研究表明,原状土抗剪强度由内磨擦力和凝聚力 2 部分组成,土壤容重与内磨擦角之间的关系不

甚明显,但对原始凝聚力及加固凝聚力有重大的影响^[1],土壤容重是土体密实程度和总孔隙度大小的反映,土壤容重越大,说明土体较密实,孔隙度越小,不易压缩,抗剪强度越大;抗剪强度与粉/黏呈负相关关系,粉/黏越小,土壤质地越黏重,抗剪强度越大;抗剪强度与天然含水量呈负相关关系,由于水分在土壤中所起的润滑作用以及对土粒的加固凝聚力的破坏作用,随着含水量的增加,原状土的内磨擦角和凝聚

力越小; 有机质含量与抗剪强度呈正相关关系, 主要是由于土壤根系增加了土壤的凝聚力(称为“根凝聚力”)^[2,3]。pH 值、阳离子交换量、盐基饱和度与土壤抗剪强度之间的统计关系皆不明显。

4.2 抗剪强度随土类发生有规律的变化

土壤抗剪强度随地带性土类的变化规律是: 褐土系列土类(包括红褐土、褐土)数值最大, 抗剪强度均值为 0.84, 然后依次是红壤系列土类(包括红壤、砖红壤、赤红壤), 黄壤系列土类(包括黄壤、红黄壤、黄

壤性土), 棕壤系列土类(包括棕壤、黄棕壤, 暗棕壤抗剪强度较小), 而黑土系列土类(包括黑土、黑钙土、栗钙土)抗剪值较小, 其中黑土抗剪强度最小, 均值仅 0.28, 是褐土系列土类均值的 1/4 左右。

在两大非地带性系列土类中, 石灰土的抗剪强度很大, 均值为 1.51, 是所有测试土类中土壤抗剪强度最大的一类, 而紫色土(包括酸性、中性、碱性紫色土)的抗剪强度值较小(0.52), 仅大于黑土、黑钙土和暗棕壤(表 7)。

表 7 不同土类的抗剪强度均值对比

测试土类	石灰土	褐土	红壤	砖红壤	赤红壤	黄壤	棕壤	黄棕壤	栗钙土	紫色土	暗棕壤	黑钙土	黑土
抗剪强度均值	1.51	0.84	0.71	0.69	0.65	0.64	0.61	0.58	0.55	0.52	0.41	0.32	0.28

4.3 抗剪强度有较明显的空间分异规律

抗剪强度的水平分异规律(表 8、图 1): 根据表 2, 表 5, 表 6 中的抗剪强度值以及制图点的定位数据, 利用 Arcinfo 软件绘制出全国土壤抗剪强度水平分布的等值线图(图 1)。全国土壤抗剪强度的水平分异规律是以贵州高原中南部和黄土高原为高值辐射中心, 向四周方向逐渐变小。全国抗剪强度相对高值区是贵州高原、黄土高原、淮北山地、闽西山区, 低值区为东北南部、甘肃西部和西秦岭地区。

表 8 全国各水土流失区的土壤抗剪强度比较

水土流失分区	抗剪强度均值	抗剪强度最大值	抗剪强度最小值
云贵高原	1.36	1.72	0.64
黄土高原	0.82	1.55	0.25
南方丘陵区	0.65	1.38	0.19
北方土石山区	0.52	1.48	0.25
四川盆地	0.49	1.34	0.15
东北漫岗丘陵区	0.42	1.26	0.06



图 1 全国土壤抗剪强度的等值线图

关于土壤抗剪强度沿垂直剖面的分异规律, 可根据抗剪强度的分层(上层 0—10 cm, 中层 20—30 cm, 下层 40—50 cm)统计数据归纳出 4 种垂直剖面构型——递增型、凹谷型、递减型和凸峰型, 全国范围内以递增型、凹谷型为普遍形式, 前者与土壤容重的向下递增有关, 后者与土壤有机质的表聚及容重的剖面变化有关。

[参 考 文 献]

[1] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 99—105.

[2] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性研究及有关问题[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 91—101.

[3] 杨维西, 黄治江. 黄土高原九个水土保持种根的抗拉力[J]. 中国水土保持, 1988(9): 47—49.

[4] 潘剑君, Ir. E. Bergsma. 利用土壤入渗速率和土壤拉剪力确定土壤侵蚀等级[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 93—96.

[5] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1997: 210—214.

[6] 龚子同, 等著. 中国土壤系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[7] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(1, 2, 3, 4, 5, 6)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.

[8] 山东省土壤肥料工作站. 山东土种志[M]. 北京: 农业出版社, 1993.

[9] 广东省土壤普查办公室. 广东土种志[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[10] 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土种志[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

[11] 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.