

黄土丘陵区不同土地利用的土壤水分灰色关联度

张北赢^{1,2}, 徐学选^{1,3,*}, 刘文兆^{1,3}, 杜 峰^{1,3}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要:运用灰色关联度分析法,分析了黄土丘陵区的延安燕沟不同土地利用方式下土壤水分的垂直变化和月动态。结果表明:梯田各层土壤水分变化态势相似程度较高,即梯田土壤水分的垂直波动较小;不同土地利用方式下均是表层(0~30cm)和中层(30~100cm)土壤水分的灰关联度较大,即土壤水分的变化发展态势较一致,但由于不同利用方式的影响,土壤水分变化态势的相似程度为梯田>白羊草>刺槐>沙棘,除白羊草地外,其他土地利用方式下表层(0~30cm)与深层(100~200)的灰关联度最小,土壤水分变化差异较大。从各月土壤水分灰关联度来看,沙棘除 10 月份外,其他各月土壤水分变化态势的相似程度较高;白羊草地正好相反,整个生长季土壤水分的变化波动很大;梯田和刺槐林地居中,但各月土壤水分变化态势的相似程度仍然存在差异,表现为雨季前各月土壤水分变化较为一致,雨季后的 9、10 月份与 4 月份相比差异较大。说明不同的土地利用方式对土壤水分的垂直变化和月动态变化均产生不同影响。

关键词:黄土丘陵区;土壤水分;灰关联分析

文章编号:1000-0933(2008)01-0361-06 中图分类号:S152.7 文献标识码:A

Grey relational analysis of soil moisture under different landuses in the Loess Hilly Region

ZHANG Bei-Ying^{1,2}, XU Xue-Xuan^{1,3,*}, LIU Wen-Zhao^{1,3}, DU Feng^{1,3}

1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0361 ~ 0366.

Abstract: Based on the data collected by random survey of soil moisture in the Loess Hilly Region, the authors analyzed the dynamic characteristics of soil moisture under different landuses. The result showed that landuses made soil moisture in vertical layer quite different. In terrace land, the variational trend of soil moisture in different layers was accordant, that is, the fluctuation of soil moisture in vertical layer was little. Under different landuses, the variation of soil moisture between surface layer (0—30cm) and middle layer (30—100cm) was accordant, and landuse, in terms of the accordant degree, ranks in the descendant order of terrace land, pasture land, forestland, and shrub land. Except pasture land, the grey relational grade of the landuses between surface layer (0—30cm) and deep layer (100—200cm) was least, which means

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40471126);中国科学院西部行动计划(二期)资助项目(KZCX2-XB2-05);中国科学院西部之光人才培养计划资助项目(2008 重点项目)

收稿日期:2007-01-29; **修订日期:**2007-10-22

作者简介:张北赢(1981~),女,甘肃兰州人,博士生,主要从事流域土壤水资源研究. E-mail: zhangbeiyiing@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471126), The West Action Program of CAS (No. KZCX2-XB2-05), Talent Training Program in West China of Chinese Academy of Sciences (important project in 2008)

Received date: 2007-01-29; **Accepted date:** 2007-10-22

Biography: ZHANG Bei-Ying, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil water resource of watershed. E-mail: zhangbeiyiing@163.com

that soil moisture varied remarkably. The grey relational grade of soil moisture in each month was different. In shrub land, except December, the variational trend of soil moisture was similar. By contraries, grass land had the different trend, and the fluctuation of soil moisture in growth season was great. It can be seen that the different landuses resulted in the difference of dynamic characteristics of soil moisture.

Key Words: Loess hilly region; Soil moisture; Grey relational analysis

土壤水是生态系统中植物赖以生存的基础,同时也是流域水循环中最为活跃的部分,影响着植物生长、生态环境建设以及水资源的合理分配与高效利用^[1]。黄土高原大部分地区地处半干旱、半湿润地区,加之其特殊的成土过程形成的“土壤水库”,使得土壤水在该区生态环境建设中发挥着不可替代的作用。前人对该区不同植被类型的土壤水分特征及其季节动态和垂直变化进行了较系统的研究,结果表明:①农林草地土壤水资源的利用有明显差异,一般农地土壤水含量较高,林草地较低^[2~5],一些人工林草地甚至出现了利用型“土壤干层”^[6~8];高产农地的土壤水分也存在严重消耗^[9]。②黄土高原北部半干旱丘陵区的土壤水分季节动态可分为4个时期:土壤水分缓慢蒸发期、旱季强烈失水期、雨季土壤水分蓄积期和土壤水分相对稳定期^[10]。③韩仕峰^[11]研究了黄土区裸地土壤剖面的水分分布特征,将其分为速变层、活跃层、次活跃层和相对稳定层4个层次;王孟本等^[12]考虑了林草的作用,根据土壤含水量标准差(SD)判别法,将林下土壤水分分布分为活跃层、次活跃层和相对稳定层3个层次。基于对不同土地利用方式的土壤水分特征的充分认识,本文以黄土丘陵区的延安燕沟流域为研究对象,首次运用灰关联法分析不同土层深度、不同土地利用方式的土壤水分灰关联度,旨在明确该区不同利用方式下土壤水分的剖面 and 季节变化特征,从而更好地为生态环境建设提供土壤水分依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区选在黄土高原丘陵沟壑区第Ⅱ副区的延安燕沟,位于延安市南10km处。处于暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡带,年平均气温9.8℃,多年平均降水量为558.4mm,其中,6~9月份降水量占全年降水量的70%以上,且多以暴雨形式出现,年际变化也很大;年蒸发量1000mm左右。

2005年降水量为477.8mm,其中生长季(4~10月份)降水量为434.4mm,低于多年平均水平。降水年内分布与多年平均状况一致:4~6月份干旱少雨,7~9月份降水较多,降水峰期始于7月份。整个生长季降水量分配极不均匀,7月份最多,达到129.5mm,而10月份降水量仅为13.3mm,7~9月份3个月降水量之和占整个生长季的70%以上。

试验测定在黄绵土土壤进行。

1.2 样点选择与土壤水分测定

运用土钻法实行定位监测:以南北向、西向三个大断面测定农、林、草、灌土壤水分,布设28个采样点。定位监测每月1次(4~10月份),其中,4月和10月份测深为400cm,5~9月份测深为200cm。0~1m每10cm取样,1m以下每20cm取样。土样用烘箱在105~110℃下烘干8h计算水分,用重量百分比(干土重%)表示。

1.3 灰关联分析法

对于两个系统之间共有的影响因素,其随时间或不同对象而变化的关联性大小的量度,称为关联度^[13~15]。在系统发展过程中,若两个因素变化的趋势具有一致性,即同步变化程度较高,即可谓二者关联程

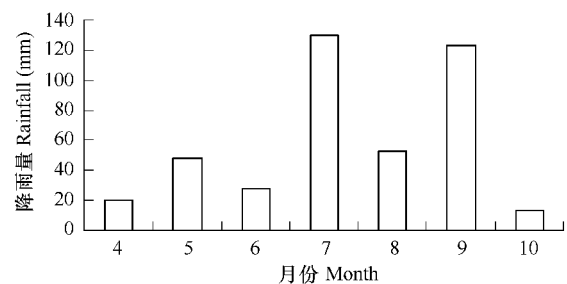


图1 2005年生长季降雨量分布

Fig. 1 The distribution of rainfall in growth season of 2005

度较高;反之,则较低。因此,灰色关联分析方法,是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,亦即“灰色关联度”,作为衡量因素间关联程度的一种方法。在进行数据列关联分析时,必须先确定参考数列,然后比较其它数列同参考数列的接近程度,这样才能对其它数列进行比较,进而做出判断。

设 $X_0 = \{X_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ 为参考数列(又称母数列), $X_i = \{X_i(k) | k=1, 2, \dots, n\} (i=1, 2, \dots, m)$ 为比较数列(又称子数列),则 $X_i(k)$ 和 $X_0(k)$ 的关联系数为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式中, ρ 称为分辨系数。 ρ 越小,分辨力越大。一般 ρ 的取值范围为 $[0, 1]$, 更一般地取 $\rho = 0.5$ 。 $|x_0(k) - x_i(k)|$ 称为 X_0 与 X_i 第 k 个指标(或时刻、空间)的绝对差; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 和 $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 分别称为两级极小差和两级极大差。于是,据此可求出 $X_i(k)$ 与对应的 $X_0(k)$ 关联系数:

$$\xi_i = \{\xi_i(k) | k=1, 2, \dots, n\}$$

从关联系数的计算来看,得到的是各比较数列与参考数列在各点的关联系数值,结果较多,信息过于分散,不便于比较,因而有必要将每一比较数列各个时刻(或指标、空间)的关联系数集中体现在一个值上,这个数值就是灰关联度。比较数列对参考数列的灰关联度常记作 $r(x_0, x_i)$, 通常简记为 r_i 。常用的计算关联度的方法为平均值法,即:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (2)$$

灰关联度越大,表明二者的几何曲线形状越接近,即发展变化态势越接近。

土壤水分灰色关联度,是影响土壤水分的各因素综合作用的体现。在本研究中,灰关联程度高的土壤水分,可作为不同地类土壤水分对比的参照,并为不同流域土壤水分比较提供选择依据。

2 结果分析

2.1 不同层次土壤水分灰关联分析

选取了具有代表性的农、林、灌、草 4 种土地类型,将土壤剖面划分为表层 0~30cm、中层 30~100cm 和深层 100~200cm 3 个层次,各层 4~10 月土壤水分数列分别设为 $X_1 = \{X_1(k) | k=4, 5, \dots, 10\}$ 、 $X_2 = \{X_2(k) | k=4, 5, \dots, 10\}$ 、 $X_3 = \{X_3(k) | k=4, 5, \dots, 10\}$ 。分别以表层为参考数列,中层和深层为比较数列(分别记为 R_{12} 和 R_{13})以及中层为参考数列,深层为比较数列(记为 R_{23}),根据(1)式和(2)式计算其灰关联度。表 1 即为不同层次土壤水分灰关联度。

表 1 不同深度土壤水分灰关联度

Table 1 Grey relational grade of soil moisture in different layers

灰色关联度 Grey relational grade	梯田 Terrace land	白羊草地 Pasture land <i>Bothriochloa ischoemum</i>	刺槐林 Forestland <i>Robinia pseudoacacia</i>	沙棘灌丛 Shrub land <i>Hippophae</i>
R_{12}	0.8322	0.7810	0.7538	0.7442
R_{13}	0.7138	0.7026	0.6370	0.6610
R_{23}	0.7804	0.6982	0.6464	0.7068

由表 1 可以看出,梯田、刺槐林和沙棘灌丛有相似规律,均是表层与中层土壤水分关系密切,与深层关联性次之,表明这 3 种土地利用方式下中层土壤水主要源自表层渗流,降水产生的表层渗流能够直接到达中层(100cm),还有部分可以到达深层(100cm 以下)。深层含水率与中层含水率关系密切,其关联性好于表层与深层,说明深层土壤水主要来自中层土壤水的二次渗流,部分来自表层土壤水,其消耗也要经过中层。另外,表层与中层关联性最好,说明一次渗流对土壤水的作用好于二次渗流。

与其他 3 种地类不同,白羊草表层与深层和中层与深层土壤水分灰关联度差异不大,说明在白羊草这种土地利用方式下,一次渗流和二次渗流对深层土壤水分的作用相当。

2.2 不同土地利用方式土壤水分灰关联分析

从表 1 还可以看出,在不同的土地利用方式下,均是表层(0~30cm)与中层(30~100cm)土壤水分的变化态势最为接近,但横向比较来看,梯田的接近程度最好,白羊草次之,刺槐和沙棘较差,说明不同土地利用方式下表层渗流对中层土壤水分的补给程度不用。表层与深层、中层与深层的土壤水分变化态势的接近程度较表层与中层为弱,但相对而言,梯田接近程度较好,刺槐较差,说明与刺槐相比,梯田这种土地利用模式对土壤水分的调控作用深度相对较深,土壤水分在垂直方向上的变化趋势较为缓和。由此可见,不同的土地利用方式对不同层次土壤水分的变化发展态势会产生不同的影响。

2.3 不同月份土壤水分灰关联分析

图 1 所示的是农、林、灌、草不同土地利用方式下土壤水分垂直分布的月动态。由图可见,沙棘灌丛 10 月份的土壤水分剖面曲线明显远离了其他月份,与 4 月份本底值相差最远,可以预计 4 月份与 10 月份灰关联度最小,另外,5~9 月份土壤水分剖面曲线与 4 月份差异很小,也可预计 4 月份与 5~9 月份土壤水分灰关联度较大;白羊草地 4 月份土壤含水量整体较高,其他月份土壤水分均偏低,可以预计 4 月份与其他月份的土壤水分灰关联度为 4 种土地利用方式中最小的;梯田各月土壤水分剖面曲线差异不大,但略小于沙棘灌丛,可预计其土壤水分灰关联度略小于沙棘灌丛,刺槐则小于梯田。

现在用灰关联方法进行具体分析。在整个生长季,4 月份处于土壤水分稳定期之后^[10],其土壤水分的变化基本可以反映本年内土壤水分的初始值,因此在计算不同月份土壤水分灰关联度时,以 4 月份为参考数列 $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, 15\}$, k 表示 0~200cm 划分为 15 个层次。5~10 月份土壤水分作为比较数列 $X_5, X_6, \dots, X_{10}$, 根据(1)、(2)式计算得灰关联度列于表 2 中。

表 2 不同月份土壤水分灰关联度

Table 2 Grey relational grade of soil moisture in different months

灰色关联度 Grey relational grade	梯田 Terrace land	白羊草地 Pasture land <i>Bothriochloa ischaemum</i>	刺槐林 Forestland <i>Robinia pseudoacacia</i>	沙棘灌丛 Shrub land <i>Hippophae</i>
R_{05}	0.8607	0.5274	0.7281	0.8580
R_{06}	0.7956	0.4403	0.7255	0.8626
R_{07}	0.7745	0.5009	0.6731	0.8161
R_{08}	0.8497	0.4397	0.7002	0.8889
R_{09}	0.6679	0.4342	0.6120	0.7283
R_{10}	0.6740	0.5905	0.6379	0.5769

从整体上来看,沙棘除 10 月份外灰关联度最大,梯田次之,刺槐林略小于梯田,白羊草地最小,这与前述分析相吻合。

再来分析不同地类各月的灰关联度。沙棘灌丛 5~9 月份与 4 月份土壤水分灰关联度较大,仅 10 月份关联度小,说明 5~9 月份土壤水分变化态势与 4 月份的接近程度较好,仅 10 月份的接近程度差(这与图 1 吻合)。8 月份土壤水分的变化态势与 4 月份最为接近(灰关联度最大),表明该时期虽然经过了降雨量最多的 7 月份对土壤水分的补偿作用,但由于植物生长也处于旺盛时期,蒸腾耗水与降雨补水在一定程度上相互抵消;同样地,10 月份虽然也经过 9 月份较多的降雨对土壤水分的补偿作用,但植物的生长基本停止,蒸腾耗水对土壤水分的影响基本可以忽略,所以其土壤水分与 4 月份相比有较显著增加,其变化态势与 4 月份相比差异显著,灰关联度降低。与沙棘明显不同的是白羊草地,5~10 月份与 4 月份灰关联度均较小,土壤水分的变化态势与 4 月份均存在很大差异,整个生长季内土壤水分波动很大。

梯田 5 月和 8 月土壤水分变化态势与 4 月份较接近,9、10 月份接近程度较差;5 月份降雨量虽较 4 月份多,但温度也比 4 月份高,降雨的补偿作用与土壤蒸发作用相互抵消,使得 5 月份土壤水分变化态势与 4 月份接近;到了 8 月份,降雨量、温度、作物蒸腾等因素都相应增加,降雨对土壤水分的补偿作用与土壤蒸发、作物蒸腾相平衡,故其土壤水分变化态势与 4 月份差异不大;9、10 月份温度下降,土壤蒸发耗水减少,作物收获后

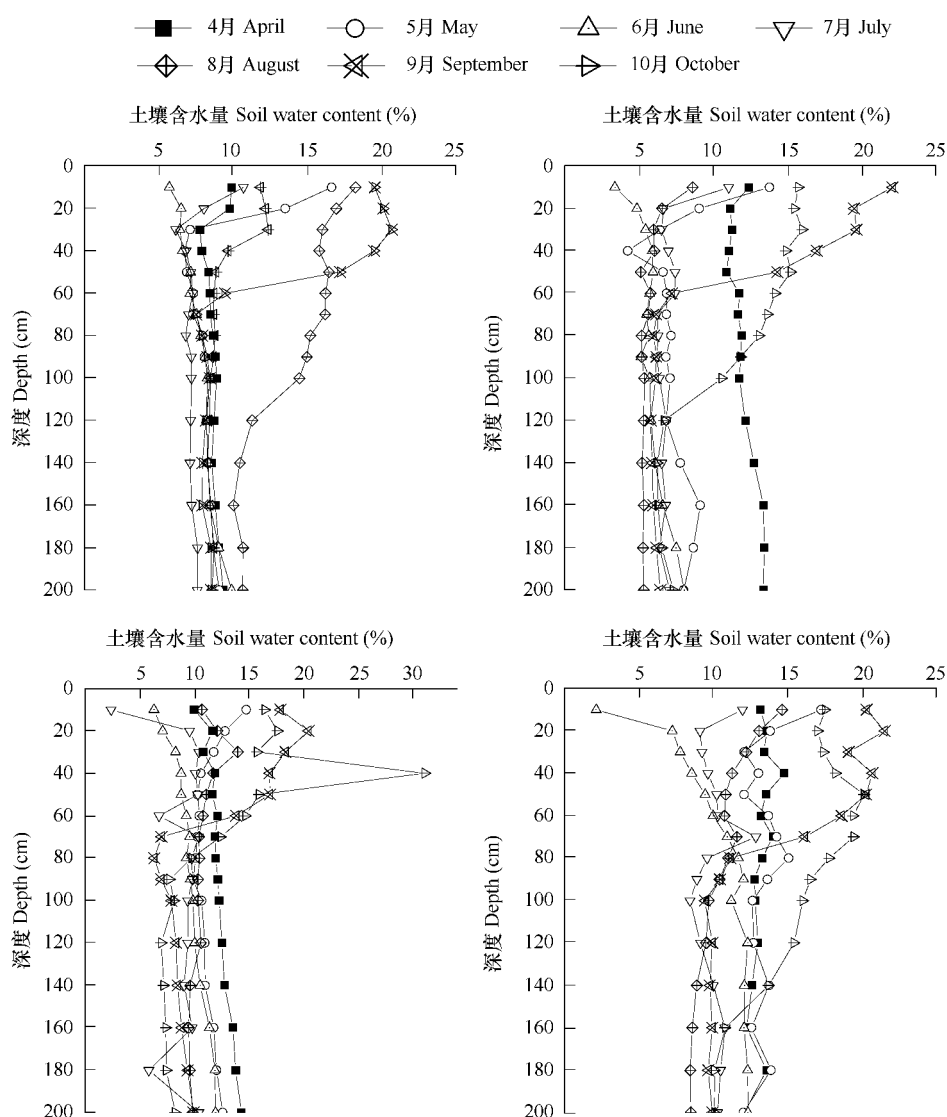


图2 不同土地利用方式土壤水分垂直动态

Fig.2 The vertical dynamic of soil moisture under different land uses

1. *Hippophae* land 2. *Bothriochloa ischaemum* land 3. Terrace land 4. *Robinia pseudoacacia* land

其蒸腾耗水项不计,降雨对土壤水分的补偿作用明显,故其土壤水分变化态势发生了较大变化。刺槐林与梯田较为相似,5、6月份土壤水分变化态势与4月份较为接近,9、10月份接近程度较差。

由此可见,通过灰关联度分析土壤水分的变化态势,与仅从试验数据分析具有相同的结论,灰关联分析可以较好地用于分析土壤水分年内变化趋势。

3 结论

灰关联分析法可以较好地反映土壤水分变化趋势的相似或相异程度。由于A与B的灰关联度和B与A的灰关联度不同,故在计算灰关联度时,要选定参考数列和比较数列。

不同土地利用方式下各层土壤水分的变化态势不同。总体来说,表层(0~30cm)与根系层(30~100cm)土壤水分变化态势的相似程度较高,不同地类的相似程度梯田>白羊草>刺槐>沙棘。除白羊草地外,其他土地利用方式下表层与稳定层的灰关联度最小,土壤水分变化态势差异较大。

从各月土壤水分灰关联度来看,沙棘4~9月份的土壤水分变化态势的相似程度较高,10月份出现明显差异;而白羊草地整个生长季的土壤水分变化态势差异很大;梯田与刺槐林地居中,但各月土壤水分的变化态

势的相似程度仍然存在差异,雨季前各月土壤水分变化态势较为接近,雨季后的 9、10 月份与 4 月份相比差异较大。

土地利用方式对土壤水分的垂直变化和季节变化都会产生影响。从本研究的结果来看,沙棘灌木对土壤水分垂直变化影响较大;而白羊草地对土壤水分的季节动态产生较大影响。

Reference:

- [1] Wang H, Yang G Y, Jia Y W, *et al.* Connotation and assessment index system of soil water resources. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37 (4): 389—394.
- [2] Fu B J, Wang J, Ma K M. Effect of land use on soil water in Loess Hilly area. *Science Foundation of China*, 1999, 4: 225—227.
- [3] Xu X X, Liu J H, Gao P, *et al.* A study on the effect of soil moisture of different vegetation in Loess Hilly Region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(8): 1347—1351.
- [4] Yang W Z, Ma Y X, Han S F, *et al.* Soil water ecological regionalization of afforestation in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 8(1): 1—9.
- [5] Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433—438.
- [6] Yang W Z, Shao M A, Peng X D, *et al.* On the relationship between environmental aridization of the Loess Plateau and soil water in loess. *Science in China(Series D)*, 1999, 42(3): 240—249.
- [7] Hou Q C, Han R L, Han S F. The preliminary research on the problems of soil drying in artificial forest and grass land in the Loess Plateau. *Soil and Water Conservation in China*, 1999, (5): 11—14.
- [8] Wang L, Shao M A, Hou Q C. Status of dried soil layer in the Yan'an experimental area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(3): 35—37.
- [9] Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91—101.
- [10] Yang W Z, Shao M A. The study on soil water in the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000.
- [11] Han S F. The variational law of soil moisture and the effective use of soil water in dry land. *Agriculture Science in Shanxi*, 1990(7): 20—23.
- [12] Wang M B, Li H J. Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantations in the Loess Plateau region in northwestern Shanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(2): 178—184.
- [13] Deng J L. The basic method of gray system. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 1987.
- [14] Wang X M, Mu Y Y, Tang Y L. Preliminary exploration on the methodology of system analysis. *Journal of Systemic Dialectics*, 1995, 3(2): 85—89.
- [15] Xia J. The application of Excel 2000 in the gray correlation analysis. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2004, 21(2): 117—121.

参考文献:

- [1] 王浩,杨贵羽,贾仰文,等. 土壤水资源的内涵及评价指标体系. *水利学报*, 2006, 37(4): 389~394.
- [2] 傅伯杰,王军,马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响. *中国科学基金*, 1999, 4: 225~227.
- [3] 徐学选,刘江华,高鹏,等. 黄土丘陵区植被的土壤水文效应. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1347~1351.
- [4] 杨文治,马玉玺,韩仕峰,等. 黄土高原地区造林土壤水分生态分区研究. *水土保持学报*, 1994, 8(1): 1~9.
- [5] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. *自然资源学报*, 16(5): 433~438.
- [6] 杨文治,邵明安,彭新德,等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系. *中国科学 D 辑*, 1998, 28(4): 357~365.
- [7] 侯庆春,韩蕊莲,韩仕峰. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. *中国水土保持*, 1999(5): 10~14.
- [8] 王力,邵明安,侯庆春. 延安试区土壤干层现象分析. *水土保持通报*, 2000, 20(3): 35~37.
- [9] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3(2): 92~101.
- [10] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京:科学出版社, 2000.
- [11] 韩仕峰. 旱地土壤水分变化规律及有效利用. *山西农业科学*, 1990(7): 20~23.
- [12] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究. *生态学报*, 1995, 15(2): 178~184.
- [13] 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉:华中理工大学出版社, 1987.
- [14] 王学荫,穆月英,唐翼东. 灰色系统分析方法论初探. *系统辩证学学报*, 1995, 3(2): 85~89.
- [15] 夏军. Excel2000 在灰关联分析中的应用. *中国卫生统计*, 2004, 21(2): 117~121.