

安家沟流域不同土地利用方式水土流失对影响因素变化的响应

常军霞,马海霞*,张佰林,张文祥,李旭春

(定西市水土保持科学研究所,甘肃 定西 743000)

摘要:【目的】探究不同土地利用方式对水土流失的影响因素,以期为黄土丘陵沟壑区进一步开展生物措施工程提供理论依据。【方法】以定西市安家沟流域径流场2005—2020年雨季的降水量、径流量和产沙量监测数据为依据,探究不同土地利用方式的径流泥沙变化,并对影响因素进行相关和回归分析。【结果】不同土地利用方式土壤含水率排列顺序为封禁地>沙棘地>油松地>人工草地>农地,且随坡度的增大依次减小,20~40 cm土层土壤含水率最高,达到14.75%。【结论】不同土地利用方式径流由大到小的排列顺序为农地>人工草地>油松林地>封禁>沙棘地,侵蚀模数由大到小的排列顺序为农地>油松林地>人工草地>封禁>沙棘地, ≤ 1 mm根系参数的排列顺序与侵蚀模数的排序刚好相反。以上研究可以为黄土丘陵沟壑区进一步开展生物措施工程提供理论依据。

关键词:土地利用方式;径流深;侵蚀模数;根系参数

中图分类号:S152.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)06-0073-08

DOI:10.13817/j.cnki.cyyep.2023.06.011



植被对降水的截留主要是由于覆盖度的增加减小了雨滴的能量,从而削弱了降水侵蚀的强度,原因是枯枝落叶层如同一层棉被保护着土壤表面,进而拦截和减缓径流流速,减弱侵蚀^[1],同时植被根系是调节土壤渗透特性的重要参数,其值大小影响着边坡土壤侵蚀的程度^[2]。有研究发现,植物根系的存在可改善土壤的入渗性能^[3],根长密度和根表面积密度越大、土壤入渗能力越强,则土壤水分含量越高^[4]。土壤水分受降水、植被、土壤、地形以及气温等综合因素的影响,表现出时空尺度上的差异^[5-6],其中地形的变化还会改变降水产流所造成的土壤侵蚀,植被类型、分布与土壤侵蚀之间存在着控制和被控制的作用^[7]。黄土丘陵沟壑区处于干旱半干旱地区,全年总降水量少,

且雨量集中,是中国水土流失最为严重的地区。有学者研究发现,退耕还林还草在很大程度上促进了黄土高原地区植被恢复,改善了土壤基本性质,进而降低水土流失^[8]。为此,本研究以定西市水土保持科学研究所安家沟流域径流场2005—2020年雨季的降水量、径流量和产沙量监测数据为依据,探究不同土地利用方式的水域流失及影响因素,以期为黄土丘陵沟壑区进一步开展生物措施工程提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

安家沟流域是黄河流域祖厉河水系关川河的一条小支沟,属黄土丘陵沟壑区第V副区,位于甘肃省定西市,地理位置N 35°33′02″~35°35′29″,E 104°38′13″~104°40′25″,海拔1 900~2 250 m,流域面积约8.56 km²,地形起伏较大,形成两沟、一梁、四面坡的地貌景观,属于典型的黄土丘陵沟壑区。年均温6.13℃,流域内年降水量达到427 mm,蒸发量1 510 mm,多以暴雨为主,降水主要集中在7—9月, ≥ 10 ℃的年活动积温2 239.1℃,年温差大,极端最高

收稿日期:2022-09-16;修回日期:2022-11-08

基金项目:定西市重点技术攻关专项(DX2021AZ01)

作者简介:常军霞(1980-),女,甘肃会宁人,工程师,研究方向为水土保持与生态治理。

E-mail:15693340308@163.com

*通信作者。E-mail:mhx_qhdx@163.com

气温 34.3 °C, 极端最低气温 -27.1 °C, 年日照时数 2408.6 h, 无霜期 141 d, 属中温带半干旱气候^[9]。该研究区位于安家沟流域中坡位, 土壤主要类型为黄绵土, 坡面土层厚度平均为 200 cm; 以豆科、菊科和禾本科等草本植物为主, 并分布有少量的灌木^[10-11]。

1.2 试验设计与方法

本研究共设 5 种土地利用方式, 包括种植人工草地、沙棘地、油松林地、农地以及封禁地。其中人工草地为撒播种植的紫花苜蓿, 农地为撒播小麦。不同土地利用方式各设 4 个处理, 分别为 20°、15°、10°和 5°, 各处理设 3 个重复, 共计 60 个(4×3×5)小区。小区面积均为 50 m²(10 m×5 m), 该小区建立于 2005 年。试验样地概况详见表 1。

表 1 试验样地概况
Table 1 Survey of test plot

| 小区 | 树种(优势种) | 拉丁学名 | 密度株数/ (株·100 m ⁻²) | 株高/m | 冠幅/m | 盖度(郁闭度)/% |
|------|---------|---|-----------------------------------|-----------|---------|-----------|
| 油松林地 | 油松 | <i>Pinus stabuliformis</i> | 10 | 4.5 | 2.3×2.5 | 0.9 |
| 沙棘地 | 沙棘 | <i>Hippophae rhamnoides</i> | 400 | 1.5 | 1.0×1.2 | 30.0 |
| 人工草地 | 紫花苜蓿 | <i>Medicago sativa</i> | 50 000 | 0.3 | | 50.0 |
| 农地 | 小麦 | <i>Triticum aestivum</i> | 23 000 | 0.8 | | 80.0 |
| 封禁 | 冰草/针茅 | <i>Agropyron cristatum/ Stipa capillata</i> | 120/110 | 0.25/0.64 | | 100.0 |

1.3 数据处理与分析

用 Excel 2007 软件进行数据录入和做图, 计算变异系数=标准差/平均值。使用 SPSS 20.0 数据分析软件对不同土地利用方式不同坡度间的土壤水分含量、根系含量以及水土流失量进行单因素方差(One-way Anova)分析, 并对根系参数和径流泥沙的关系进行线性回归(Linear Regression)分析。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤水分含量

不同土地利用方式下不同土层土壤含水率以 20~40 cm 土层最高, 达到 14.75%; 其次 0~20 cm 土层, 为 11.50%; 40~60、60~80、80~100 cm 土层土壤含水率依次减小, 分别为 8.50%、7.50% 和 7.00%。不同土层土壤含水率 20~40 cm > 0~20 cm > 40~60 cm > 60~80 cm > 80~100 cm, 且 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层之间土壤含水率差异显著($P < 0.05$), 而

本研究通过收集 2005—2020 年安家沟小流域水土流失监测数据, 统计分析该时间段内不同土地利用方式的水土流失变化趋势。 ≤ 1 mm 植物根系含量采用土壤冲洗法, 2022 年 7 月上旬进行壤采样, 在每种样地内按照 S 型, 避开边缘及特殊位置设定 3 个样点, 除去表层 10 cm 土壤, 在 10~30 cm 土层取样, 约 1 kg, 剔除石块和动植物残体后, 将同一小区的 3 个土样充分混匀作为处理的一个重复备用。样品室内分析测试于 2022 年 8 月下旬完成。

依据文献^[12-14]对土壤水分垂直分布的划分研究, 采用变异系数法对研究区内不同土地利用方式 0~100 cm 土层土壤含水率进行垂直划分, 分别划分为显著变化层($C_v > 0.2$)、次变化层($0.2 > C_v > 0.1$)及相对稳定层($C_v < 0.1$)。

60~80 cm 和 80~100 cm 土层之间土壤含水率差异显著($P < 0.05$)。不同土地利用方式不同坡度土壤含水率由大到小的排序为 5° > 10° > 15° > 20°, 且不同坡度之间差异不显著性。不同土地利用方式土壤含水率平均值封禁地最高, 为 12.15%, 农地最低, 为 9.30%, 其排列顺序为封禁地 > 沙棘地 > 油松地 > 人工草地 > 农地, 且沙棘地和封禁地, 人工草地、农地和油松地之间土壤含水率差异不显著, 其余均差异显著($P < 0.05$)。

结果显示, 人工草地显著变化层为 0~80 cm 土层, 次变化层 80~100 cm 土层; 农地显著变化层为 0~40 cm 土层, 次变化层 40~80 cm 土层, 相对稳定层 80~100 cm 土层; 油松和沙棘土壤水分垂直变化 0~100 cm 土层均未达到稳定; 封禁地显著变化层为 0~40 cm 土层, 次变化层 40~80 cm 土层, 相对稳定层 80~100 cm 土层(表 2)。

2.2 不同土地利用方式植物根系参数

农地 ≤ 1 mm 植物根系含量平均值最小, 根重密

表 2 不同土地利用方式土壤含水率及变异系数

Table 2 Soil moisture and variation coefficient by different land use patterns

| 利用方式 | 坡度 | 土壤含水率/% | | | | | 平均值 AVG |
|------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | | 0~20 cm | 20~40 cm | 40~60 cm | 60~80 cm | 80~100 cm | |
| 人工草地 | 5° | 12.00 ^{bA} | 16.00 ^{aA} | 10.00 ^{cA} | 9.00 ^{cA} | 9.00 ^{cA} | 11.20 ^A |
| | 10° | 12.00 ^{bA} | 15.00 ^{aA} | 10.00 ^{cA} | 9.00 ^{cA} | 9.00 ^{cA} | 11.00 ^A |
| | 15° | 11.00 ^{bA} | 14.00 ^{aA} | 7.00 ^{bC} | 6.00 ^{cC} | 5.00 ^{dB} | 8.60 ^B |
| | 20° | 11.00 ^{bA} | 14.00 ^{aA} | 7.00 ^{dC} | 6.00 ^{cC} | 5.00 ^{dB} | 8.60 ^B |
| | 平均值 AVG | 11.50 | 14.75 | 8.50 | 7.50 | 7.00 | 9.85 |
| | 标准差 STDV | 3.42 | 4.58 | 2.63 | 3.09 | 1.45 | — |
| | 变异系数 Cv | 0.29 | 0.3 | 0.24 | 0.29 | 0.15 | — |
| 农地 | 5° | 11.00 ^{bA} | 15.00 ^{aD} | 10.00 ^{cA} | 8.00 ^{dA} | 8.00 ^{dA} | 10.40 |
| | 10° | 9.00 ^{bB} | 13.00 ^{aB} | 10.00 ^{bA} | 8.00 ^{cA} | 8.00 ^{cA} | 9.60 |
| | 15° | 8.00 ^{cB} | 13.00 ^{aB} | 9.00 ^{bB} | 7.00 ^{dB} | 7.00 ^{dB} | 8.80 |
| | 20° | 7.00 ^{cC} | 13.00 ^{aB} | 9.00 ^{bB} | 7.00 ^{cA} | 6.00 ^{eB} | 8.40 |
| | 平均值 AVG | 9.75 | 12.50 | 9.50 | 7.50 | 7.25 | 9.30 |
| | 标准差 STDV | 3.15 | 3.53 | 1.29 | 1.13 | 0.42 | — |
| | 变异系数 Cv | 0.33 | 0.27 | 0.18 | 0.16 | 0.07 | — |
| 沙棘地 | 5° | 13.00 ^{bA} | 16.00 ^{aA} | 10.00 ^{cA} | 9.00 ^{cA} | 8.00 ^{cA} | 11.20 |
| | 10° | 13.00 ^{bA} | 16.00 ^{aA} | 10.00 ^{cA} | 9.00 ^{cA} | 8.00 ^{cA} | 11.20 |
| | 15° | 12.00 ^{bA} | 15.00 ^{aA} | 9.00 ^{cA} | 6.00 ^{dB} | 6.00 ^{dB} | 9.60 |
| | 20° | 12.00 ^{bA} | 15.00 ^{aA} | 9.00 ^{cA} | 6.00 ^{dB} | 6.00 ^{dB} | 9.60 |
| | 平均值 AVG | 12.50 | 15.50 | 9.50 | 7.50 | 7.00 | 10.40 |
| | 标准差 STDV | 4.58 | 3.22 | 3.01 | 2.61 | 3.34 | — |
| | 变异系数 Cv | 0.38 | 0.21 | 0.28 | 0.28 | 0.38 | — |
| 油松林地 | 5° | 14.00 ^{bA} | 16.00 ^{aA} | 10.00 ^{cA} | 8.00 ^{cA} | 7.00 ^{dA} | 11.40 |
| | 10° | 13.00 ^{bA} | 14.00 ^{aA} | 10.00 ^{cA} | 8.00 ^{cA} | 7.00 ^{dA} | 10.40 |
| | 15° | 11.00 ^{bA} | 13.00 ^{aB} | 9.00 ^{cA} | 6.00 ^{dB} | 6.00 ^{dA} | 9.00 |
| | 20° | 10.00 ^{bB} | 12.00 ^{aB} | 9.00 ^{bA} | 6.00 ^{eB} | 6.00 ^{cA} | 8.60 |
| | 平均值 AVG | 12.00 | 13.75 | 9.00 | 7.00 | 6.50 | 9.85 |
| | 标准差 STDV | 10.63 | 4.45 | 3.91 | 2.87 | 2.44 | — |
| | 变异系数 Cv | 0.77 | 0.29 | 0.39 | 0.32 | 0.29 | — |
| 封禁 | 5° | 14.00 ^{bA} | 17.00 ^{aA} | 12.00 ^{cA} | 12.00 ^{cA} | 11.00 ^{dA} | 12.80 |
| | 10° | 14.00 ^{bA} | 18.00 ^{aA} | 12.00 ^{bA} | 12.00 ^{bA} | 11.00 ^{cA} | 12.80 |
| | 15° | 13.00 ^{bA} | 17.00 ^{aA} | 11.00 ^{bA} | 12.00 ^{bA} | 11.00 ^{cA} | 12.00 |
| | 20° | 13.00 ^{bA} | 18.00 ^{aA} | 11.00 ^{bA} | 6.00 ^{eB} | 6.00 ^{eB} | 11.00 |
| | 平均值 AVG | 13.50 | 17.50 | 11.50 | 10.50 | 9.75 | 12.15 |
| | 标准差 STDV | 3.08 | 3.47 | 1.75 | 1.23 | 0.78 | — |
| | 变异系数 Cv | 0.22 | 0.22 | 0.15 | 0.11 | 0.08 | — |

注:同行不同小写字母表示同一利用方式不同土层之间土壤含水率差异显著($P < 0.05$);同列不同大写字母表示同一利用方式不同坡度之间土壤含水率差异显著($P < 0.05$)

度为 0.647 mg/cm³、根长密度为 2.742 cm/cm³、有效根密度为 198.248 个/(100 cm²)、根表面积为 0.151 cm²/cm³以及根体积为 0.001 cm³/cm³;沙棘地 ≤1 mm 植物根系含量平均值最大,根重密度为 1.447 mg/cm³、根长密度为 6.138 cm/cm³、有效根密

度为 223.408 个/(100 cm²)、根表面积为 0.338 cm²/cm³以及根体积为 0.003 cm³/cm³,因此,≤1 mm 植物根系含量由大到小的排列顺序为沙棘地>封禁>人工草地>油松林地>农地,其中沙棘地与其他土地利用方式之间均存在差异显著($P < 0.05$)(表 3)。

表3 不同土地利用方式植物根系参数
Table 3 Root parameters in different land use patterns

| 利用方式 | 坡度/° | 根重密度(RMD)/ (mg·cm ⁻³) | 根长密度(RLD)/ (cm·cm ⁻³) | 有效根密度(ERD)/ 个·(100cm ²) ⁻¹ | 根表面积(RAR)/ (cm ² ·cm ⁻³) | 根体积(RVL)/ (cm ³ ·cm ⁻³) |
|------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|
| 农地 | 5 | 0.586 ^B | 2.484 ^B | 183.439 ^B | 0.137 ^B | 0.0011 ^B |
| | 10 | 0.919 ^A | 3.898 ^A | 275.159 ^A | 0.215 ^A | 0.0017 ^A |
| | 15 | 0.631 ^B | 2.675 ^B | 67.516 ^C | 0.147 ^B | 0.0011 ^B |
| | 20 | 0.451 ^B | 1.911 ^B | 58.599 ^C | 0.105 ^C | 0.0008 ^B |
| | 平均 AVG | 0.647 | 2.742 | 126.592 | 0.151 | 0.001 |
| 封禁 | 5 | 0.703 ^B | 2.981 ^B | 100.637 ^C | 0.164 ^B | 0.0013 ^C |
| | 10 | 1.081 ^A | 4.586 ^A | 125.478 ^C | 0.253 ^A | 0.0020 ^A |
| | 15 | 0.991 ^A | 4.204 ^A | 198.726 ^B | 0.232 ^A | 0.0018 ^B |
| | 20 | 0.406 ^C | 1.720 ^B | 257.325 ^A | 0.095 ^C | 0.0007 ^D |
| | 平均 AVG | 0.795 | 3.373 | 170.541 | 0.186 | 0.001 |
| 沙棘地 | 5 | 2.716 ^A | 2.255 ^B | 193.631 ^B | 0.124 ^D | 0.0010 ^C |
| | 10 | 1.937 ^A | 2.561 ^B | 279.618 ^A | 0.141 ^C | 0.0011 ^C |
| | 15 | 0.604 ^B | 11.518 ^A | 275.159 ^A | 0.634 ^A | 0.0049 ^A |
| | 20 | 0.532 ^B | 8.217 ^A | 145.223 ^C | 0.453 ^B | 0.0035 ^B |
| | 平均 AVG | 1.447 | 6.138 | 223.408 | 0.338 | 0.003 |
| 油松林地 | 5 | 1.153 ^A | 4.892 ^A | 119.873 ^A | 0.269 ^A | 0.0021 ^A |
| | 10 | 0.523 ^C | 2.217 ^B | 126.624 ^A | 0.122 ^D | 0.0009 ^C |
| | 15 | 0.631 ^C | 2.675 ^B | 138.726 ^A | 0.147 ^C | 0.0011 ^C |
| | 20 | 0.712 ^B | 3.019 ^A | 128.669 ^B | 0.166 ^B | 0.0013 ^B |
| | 平均 AVG | 0.755 | 3.201 | 128.473 | 0.176 | 0.001 |
| 人工草地 | 5 | 0.586 ^B | 2.484 ^B | 126.752 ^B | 0.137 ^B | 0.0011 ^C |
| | 10 | 0.991 ^A | 4.204 ^A | 185.350 ^A | 0.232 ^A | 0.0018 ^A |
| | 15 | 0.901 ^A | 3.822 ^A | 117.834 ^C | 0.210 ^A | 0.0016 ^B |
| | 20 | 0.595 ^B | 2.522 ^B | 183.439 ^A | 0.139 ^B | 0.0011 ^C |
| | 平均 AVG | 0.768 | 3.258 | 153.343 | 0.179 | 0.001 |

注:同一列不同大写字母表示同一利用方式和不同坡度之间土壤根系含量差异显著($P < 0.05$)

2.3 不同土地利用方式水土流失量变化

不同土地利用方式的径流量均随地面坡度的增加而增大,即 $5^\circ > 10^\circ > 15^\circ > 20^\circ$,且 10° 和 15° 坡面之间的径流量无显著差异($P > 0.05$),其余均差异显著性($P < 0.05$);不同土地利用方式平均径流量沙棘地最小,为5.38 mm,其次是封禁地,为6.53 mm,最高的是农地,为13.64 mm,由大到小的排列顺序为农地>人工草地>油松林地>封禁>沙棘地,且油松林地和农

地径流量之间无显著差异,其余均差异显著($P < 0.05$)(图1-A)。不同土地利用方式侵蚀模数分析封禁地和沙棘地不同坡度的侵蚀模数均较小,农地不同坡度的侵蚀模数均较大,且封禁地不同坡度之间均差异不显著,其他土地利用方式 10° 和 15° 之间无差异不显著,其余坡度之间均差异显著($P < 0.05$);不同土地利用方式的平均侵蚀模数沙棘地最小,为23.91 t/(km²·a),其次是封禁地,为24.12 t/(km²·a),

最高的是农地,为 255.18 t/(km²·a),由大到小的排列顺序为农地>油松林地>人工草地>封禁>沙棘地,且封禁地和沙棘地之间的平均侵蚀模数无显著差异,其余均差异显著($P<0.05$)(图 1-B)。

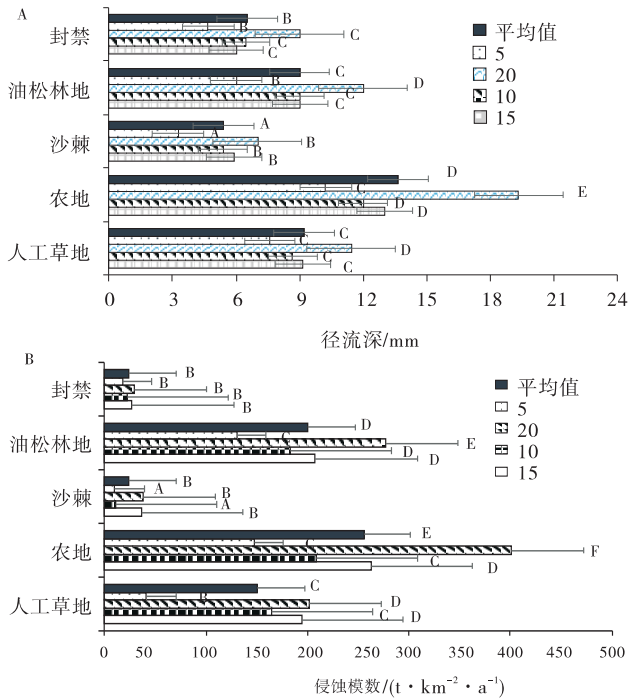


图 1 不同土地利用方式水土流失变化分析

Fig. 1 Analysis of soil and water loss change in different land use patterns

注:不同大写字母表示不同土地利用方式和不同坡度之间水土流失变化差异显著($P<0.05$)

2.4 径流泥沙相关分析

降水历时与径流泥沙之间呈正相关关系,但相关性不显著,降水量和土壤含水率与径流泥沙之间存在显著正相关关系($P<0.05$),最大 30 min 雨强与径流泥沙之间存在极显著正相关关系($P<0.01$),而坡度与径流泥沙之间存在显著正相关关系($P<0.05$)(表 4)。

2.5 根系参数与径流泥沙回归模型

通过对不同土地利用方式 ≤ 1 mm 根系参数与径流深和侵蚀模数进行线性回归分析,可见径流深和侵蚀模数分别随根系参数的增大而减小,除根表面积、根体积与径流量和侵蚀模数建立的回归方程 P 值大于 0.05 外,其余均达到最优模型($P<0.05$)(表 5)。

3 讨论

土壤水是土壤—植物—大气连续体(SPAC)的重要纽带,是植物生长的重要因素^[15],在较小区域范围内,不同地形土壤基准条件下土壤水分存在显著空间异质性^[16]。本研究得出不同土地利用方式下不同坡度土壤含水率 20~40 cm 土层最高,后依次顺序为 0~20、40~60、60~80、80~100 cm 土层,即随土层深度的增加存在先增大后减小的趋势,且草地植被封禁含水率大于人工草地土壤含水率,一方面由于天然降水对

表 4 产流产沙与影响因子的相关关系

Table 4 Relationship between runoff and sediment yield and influencing factors

| | | 降水历时 | 降水量 | 最大 30 min 雨强 | 土壤含水率 | 坡度 |
|------|------|-------|--------|--------------|--------|--------|
| 人工草地 | 径流深 | 0.412 | 0.756* | 0.827** | 0.348 | 0.748* |
| | 侵蚀模数 | 0.344 | 0.784* | 0.885** | 0.696 | 0.755* |
| 沙棘地 | 径流深 | 0.623 | 0.612 | 0.799* | 0.171 | 0.782* |
| | 侵蚀模数 | 0.586 | 0.652 | 0.790* | 0.063 | 0.675* |
| 油松林地 | 径流深 | 0.539 | 0.559 | 0.744* | 0.075 | 0.675* |
| | 侵蚀模数 | 0.518 | 0.556 | 0.758* | 0.011 | 0.626* |
| 农地 | 径流深 | 0.664 | 0.762* | 0.835** | 0.402 | 0.688* |
| | 侵蚀模数 | 0.655 | 0.885* | 0.876** | 0.721* | 0.780* |
| 封禁 | 径流深 | 0.632 | 0.748* | 0.775* | 0.451 | 0.624* |
| | 侵蚀模数 | 0.637 | 0.744* | 0.795* | 0.611 | 0.737* |

注:**表示不同土地利用方式与影响因素之间极显著相关($P<0.01$),*表示不同土地利用方式与影响因素之间显著相关($P<0.05$)

表5 根系参数与径流泥沙回归模型

Table 5 Regression model of root system parameters and runoff and sediment

| 模型 Model | R^2 | P |
|------------------------------|-------|-------|
| $y_1 = -0.189x_1 + 1.225$ | 0.848 | 0.016 |
| $y_1 = -0.804x_2 + 5.197$ | 0.730 | 0.023 |
| $y_1 = -35.808x_3 + 232.534$ | 0.329 | 0.046 |
| $y_1 = -0.043x_4 + 0.285$ | 0.145 | 0.056 |
| $y_1 = -0.001x_5 + 0.002$ | 0.307 | 0.072 |
| $y_2 = -0.189x_1 + 1.225$ | 0.326 | 0.009 |
| $y_2 = -0.006x_2 + 5.145$ | 0.327 | 0.008 |
| $y_2 = -0.294x_3 + 235.974$ | 0.389 | 0.046 |
| $y_2 = -0.001x_4 + 0.283$ | 0.128 | 0.058 |

注： y_1 代表径流深； y_2 代表侵蚀模数； x_1, x_2, \dots, x_5 分别代表根重密度、根长密度、有效根密度、根表面积以及根体积。

表层0~20 cm的土壤水分产生强烈影响^[17]，另一方面草地植被盖度越大，20~40 cm土层植物根系越密集，土壤有机质含量也越丰富，植被截留的降水顺着植物茎秆下渗，使20~40 cm土层土壤含水量最大，且受单次降水的短期影响明显，变化幅度大($C_v > 0.2$)，而20 cm以下土层的土壤含水量主要来自前期降水的补给，逐渐积累后达到稳定，且变化幅度较小($C_v < 0.1$)。封禁地土壤含水率最大，一方面土壤植被盖度越大，根系网越密集、越有利于土壤水分的存储以及下渗，并能有效缓冲天然降水的改变^[18]。

通过对2005—2020年不同土地利用方式不同坡度的径流量进行分析得出，农地径流量最大，其次是人工草地，沙棘地径流量最小，排列顺序为农地>人工草地>油松地>封禁地>沙棘地，且 $20^\circ > 15^\circ \approx 10^\circ > 5^\circ$ ，该结果与张建军等^[19]的研究结果一致，主要原因是随着植被的生长，一方面冠层截留和蒸腾了部分降水，另一方面植被根系改变了土壤结构，加大了径流入渗，从而降低了坡面径流量^[20]。对泥沙含量的研究发现，农地泥沙含量最大，封禁地最小，排列顺序为农地>油松地>人工草地>沙棘地>封禁地，结合2005—2020年间降水量，2019年降水量最大，其侵蚀性降水量为465.00 mm，年降水量为513.20 mm；2013年降雨强度最大， I_{30} 为17.81 mm/h，且2013年的径流

量和泥沙量也最大。其中，降水历时与径流泥沙之间呈正相关关系，但相关性不显著($P > 0.05$)，降水量和土壤含水率与径流泥沙之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)，最大30 min雨强与径流泥沙之间存在极显著正相关关系($P < 0.01$)，而坡度与径流泥沙之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)。可见，降水强度与侵蚀强度之间关系最为密切，其次是降雨量，该结果与^[21]的研究结果基本一致，原因是植被覆盖度、地面坡度、降水强度，以及种植模式等因素对降雨产生的水力学特性均产生了影响^[22-23]。

4 结论

(1) 不同土层土壤含水率平均值均为20~40 cm土层最高，其次0~20、40~60、60~80、80~100 cm土层土壤含水率依次减小，不同土地利用方式下土壤含水率平均值排列顺序为封禁地>沙棘地>油松地>人工草地>农地。

(2) ≤ 1 mm植物根系含量由大到小的排列顺序为沙棘地>封禁>人工草地>油松林地>农地。

(3) 不同土地利用方式径流量平均值由大到小的排列顺序为农地>人工草地>油松林地>封禁>沙棘地，不同土地利用方式侵蚀模数由大到小的排列顺序为农地>油松林地>人工草地>封禁>沙棘地。

(4) 降水量、土壤含水率以及坡度与径流泥沙之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)，最大30 min雨强与径流泥沙之间存在极显著正相关关系($P < 0.01$)，而与降水历时与径流泥沙之间相关性不显著。

(5) 径流深和侵蚀模数分别随根系参数的增大而减小，除根表面积、根体积与径流量和侵蚀模数建立的回归方程 P 值大于0.05外，其余均达到最优模型($P < 0.05$)。

参考文献：

- [1] 张志强,王盛萍,孙阁,等.流域径流泥沙对多尺度植被变化影响[J].生态学报,2006,26(1):2356~2364.
- [2] 蒋希雁,杨尚青,冯峰,等.植被根系对土体渗透特性影响的试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(3):370-375.
- [3] 王鑫皓,王云琦.根系构型对土壤渗透性能的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):73-81.
- [4] 闫东锋,王德彩,杨喜田.丹江口库区不同植被类型地表

- 根系对土壤渗透性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3):35-44.
- [5] Famiglietti J S, Ryu D, Berg A A. Field observations of soil moisture variability across scales[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(1):1-16.
- [6] 濮阳雪华, 王春春, 苟清平, 等. 陕北黄土区植被群落特征与土壤水分关系研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(11):184-191.
- [7] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, *et al.* Potential Water Yield Reduction due to Forestation across China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 9(4):96-101.
- [8] Yu M Z, Zhang L L, Xu X X, *et al.* Impact of land-use changes on soil hydraulic properties of Calcaric Regosols on the Loess Plateau, NW China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178:486-498.
- [9] 朱建佳, 彭晓伟, 刘耀亮, 等. 基于 InVEST 模型的太行山区土壤侵蚀与土壤保持[J]. *河北科技师范学院学报*, 2021, 35(1):58-66.
- [10] 陈瑾, 张佰林, 王琨. 安家沟流域地面监测数据质量及合理性评价[J]. *中国水土保持*, 2018(9):61-62.
- [11] 田野. 基于生态系统价值的区域生态产品市场化交易研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
- [12] 宋小林, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分分布[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7):121-128.
- [13] 李增尧, 赵兴凯, 朱清科. 陕北黄土区陡坡坡面因子对土壤水分的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(9):798-805.
- [14] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2):430-438.
- [15] 吕明侠, 王一博, 刘国华. 黑河上游高山区浅层土壤水分变化及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(4):899-907.
- [16] 何洁, 严友进, 易兴松, 等. 喀斯特地区土壤异质性及其与植物相互作用[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6):2249-2258.
- [17] 马驰, 蔡国军, 莫保儒, 等. 半干旱黄土区不同植被类型土壤水分时序变化差异性研究[J]. *林业科技通讯*, 2020(12):35-41.
- [18] 吕明侠, 王一博, 刘国华. 黑河上游高山区浅层土壤水分变化及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(4):899-907.
- [19] 张建军, 朱金兆, 查同刚, 等. 晋西黄土区水土保持林地抗冲性研究[J]. *北京林业大学学报*, 1998, 20(6):20-24.
- [20] Miyata S, Kosugi K, Gomi T, *et al.* Effects of forest floor coverage on over land flow and soil erosion on hills-lobes in Japanese cypress plantation forests[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(6):e149.
- [21] 江森华, 谢锦升, 王维明, 等. 闽北不同土地利用方式与不同降雨强度对水土流失的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(4):84-89.
- [22] 杨帆, 张宽地, 杨婕, 等. 不同覆盖度下坡面流植被阻力特性研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11):157-162.
- [23] 郑明星, 张富. 西北地区降雨侵蚀力时空变化规律分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(1):154-160.

Response of soil and water loss to changes of influencing factors under different land use patterns in Anjiagou watershed

CHANG Jun-xia, MA Hai-xia*, ZHANG Bai-lin, ZHANG Wen-xiang, LI Xu-chun

(1. Institute of Soil and Water Conservation in Dingxi, Dingxi 743000, China)

Abstract: [Objective] The study was carried out to explore the water loss of different land use modes and the influencing factors of land use modes on soil and water loss, in order to provide theoretical basis for further biological measures engineering in loess hilly and gully area. [Method] This study was based on the monitoring data of rainfall,

runoff and sediment yield in the Anjiagou watershed in Dingxi City, Gansu Province during the rainy season from 2005 to 2020. The change of runoff and sediment under different land use patterns and different growth years was studied. Correlation and regression analysis were made on the influencing factors. **【Result】** The results showed that the order of soil moisture content in different land use modes was enclosed land > sea buckthorn land > Chinese pine land > artificial grassland > agricultural land, and it decreased with the increase of slope. The soil moisture content decreased with the increase of slope gradient. The highest soil moisture content was in 20~40 cm soil layer. The value reached 14.75%. **【Conclusion】** The order of runoff depth in different land use modes from large to small was agricultural land > artificial grassland > tabulae forest > restricted land > sea buckthorn land. The order of erosion modulus from large to small was agricultural fields>Chinese pine fields>artificial grassland> Closure>sea buckthorn land. . The order of root parameters ≤ 1 mm was opposite to that of erosion modulus. Therefore, the project of returning farmland to forest and grassland could effectively reduce the harm caused by soil erosion in loess hilly and gully region. The above research could provide theoretical basis for further development of biological measure engineering in loess hilly and gully region.

Key words: land use patterns; runoff depth; erosion modulus; root parameters