宁夏压砂地砾石元素淋溶影响因素研究

李王成[1,2,3],赵 研[1],王 帅[1],田军仓[1,2,3],王 霞[1],王双涛[1],李 晨[1],王 兴[1],董亚萍[1]

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院,银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心,银川 750021; 3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心,银川 750021)

摘 要:研究压砂地元素淋溶对宁夏回族自治区压砂地土壤环境维护以及健康发展至关重要。为研究宁夏中卫地区压砂地在不同补水量、盐分处理和温度下的元素淋溶规律,采用电感耦合等离子体发射光谱仪及电感耦合等离子体质谱仪,测定了宁夏回族自治区中卫市环香山地区2种压砂砾石的元素含量,并根据当地多年降雨灌溉资料以及气象温度水质等数据,通过室内试验分析不同补水量、盐分及温度对压砂砾石元素淋溶的影响,同时运用多元回归法分析各影响因子对元素淋溶量变化的贡献率。结果表明:1)水分的参与对压砂砾石元素淋溶有促进作用。随着补水量的增加,绿色板岩各元素淋溶量呈波动增加趋势,红色砂岩Na、Si、Cl元素淋溶量随补水量的增加逐渐增大,Mn、Ba元素淋溶量在补水量为397 mL时出现峰值,随后淋溶量减小,通过拟合方程发现压砂砾石元素淋溶量与补水量呈对数函数关系,且拟合度较高(R2 >0.99)。2)随着矿化度的增加,元素淋溶量呈现先增大后减小的趋势,且在矿化度为3 g/L左右时的NaCl溶液处理下元素淋溶量达到最大值,然后逐渐减小。且通过拟合方程发现,压砂砾石元素淋溶量与盐分呈2次多项式关系。3)影响宁夏中卫地区元素淋溶量影响因子中,补水量对其元素淋溶量的影响最大,温度次之,盐分最小。研究可为压砂地土壤健康发展与可持续利用提供依据。

关键词:砾石;元素;淋溶;盐分;补水量
doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.018
中国分类号:O611 **文献标志码**:A **文章编码**:1002-6819(2019)-19-0152-08

李王成,赵 研,王 帅,田军仓,王 霞,王 双涛,李 晨,王 兴,董亚萍.宁夏压砂地砾石元素淋溶影响因素研究[J]. **农业工程学报**,2019.35(19):152—159. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.018 http://www.tcsae.org
Li Wangcheng, Zhao Yan, Wang Shuai, Tian Juncang, Wang Xia, Wang Shuangtao, Li Chen, Wang Xing, Dong Yaping. Influencing factors of element leaching of compressed gravel in Ningxia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 152—159. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.018 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国西北大部分地区处于干旱、半干旱地带,降水稀少,蒸发量为降水量的4~10倍。为了减少土壤水分的蒸发,当地群众发展了一种以砂石作为覆盖材料的旱作覆盖技术[1]。压砂砾石是指在海拔1 200~1 800 m,坡度≤25°,土层厚度≥80 cm,有机质质量分数≥0.6%的灰钙土或沙壤土上铺压的10~15 cm砾砂混合物[2]。从2000年以来,宁夏地区压砂地的面积逐年增加,截至2016年,当地压砂面积已有5万hm^2。压砂地种植枸杞、红枣、西瓜等作物,为当地人民创造的经济收入相当可观,已成为发展宁夏地区经济不可或缺的一部分[3]。压砂地持续利用问题引起了学者的广泛关注,目前国内外学者对压砂地的研究主要集中在抑制土壤风蚀和蒸发[4]、增温保温[5]、蓄水保墒[6]、改善土壤理化性质[7]以及土壤微生物[8]等方面。而对于压砂地覆砂材料在水分、盐分以及温度等影响下元素淋溶过程的研究较少。

淋溶作用是指一种由于雨水下渗或人工灌溉,上层砾石中的某些矿物盐类或有机物质溶解并转移到下层土壤中的作用[9-13]。张晴等通过现场分批采样检测粉煤灰复垦的土壤淋溶液,发现随着复垦土壤距离的增加,元素的浓度呈现规律性变化:在不同淋滤时间下,砷元素和锌元素的淋滤浓度排序均为14 h>2 h>8 h,铬元素和铜元素的淋滤浓度排序均为2 h>8 h>14 h,硒元素的淋滤浓度排序为14 h>8 h>2 h,而锑元素的淋滤浓度排序为8 h>2 h>14 h[14]。周福来等模拟研究了淮河淮南段河道沉积物中Cr、Zn、Cu的淋溶规律,表明重金属元素在河道沉积物中具有向下游迁移的能力,Cr、Cu溶出量随着河道沉积物粒径的减小而减小,Zn反而增大[15]。冯志刚等选择黔中地区的一条白云岩原位风化剖面作为研究对象,通过对岩-土界面淋溶过程的研究,发现在碳酸盐岩风化过程中,元素的地球化学惰性由强到弱的顺序依次为Zr>Hf>Nb>Sc>Th>Ta>Ti>Y[16]。目前针对岩石以及粉煤灰复垦土壤的元素淋溶已取得一定的研究成果,但尚缺乏针对宁夏当地压砂地元素淋溶规律的试验研究。

宁夏环香山地区覆盖土壤的砾石在不同补水水平、

收稿日期:2019-01-29 修订日期:2019-07-10
基金项目:国家自然科学基金项目(51169021、51569022),宁夏大学国内一流建设学科"水利工程"学科项目(NXYLXK2017A03)资助
作者简介:李王成,副教授,主要研究方向为节水灌溉技术与理论、农业水资源高效利用。Email:liwangcheng@126.com。

盐分以及温度等因素的影响下发生淋溶作用，其淋溶元素可能会随灌溉水的淋溶作用下渗到土壤中去，对当地土壤环境以及压砂地的可持续利用产生一定的影响。因此本文通过分析当地覆砂所用砾石风化产物的元素组成，研究不同补水量、盐分以及温度等因素影响下压砂砾石元素淋溶规律，明确各种影响因素对其元素淋溶量的影响大小。研究对压砂地土壤环境的影响至关重要，同时也与压砂地土壤健康与可持续发展息息相关。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

宁夏压砂区主要分布在中部干旱带，包括中卫香山地区，中宁丘陵山区和海原北部黄土丘陵地带。该地区是温带沙漠地区，属典型大陆性气候，年降水量在220~300 mm之间[17]。试验点位于宁夏回族自治区中卫市香山乡（36°06′N，105°15′E），海拔1 697.8 m，地下水埋深在100 m以下[18]。该地山势起伏，十年九旱，水资源匮乏，平均温度7~8.5℃，年均降水量200 mm左右，5—8月降水量占全年降水量的59%，年均蒸发量2 300 mm以上，无霜期140~150 d，具有干旱少雨且蒸发量大的典型气候特点[19]。当地植被为半荒漠和荒漠植被，植被覆盖度低，草地稀薄，水土流失严重，当地经济作物主要为压砂瓜和枸杞等。

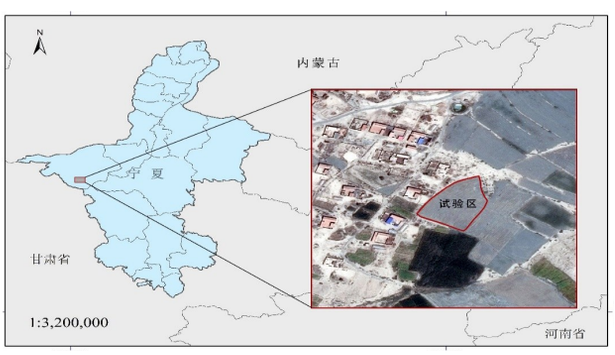


图1 试验点位置
Fig.1 Test point location

1.2 试验材料与方法

1.2.1 试验材料

试验选取宁夏中卫当地2种压砂砾石进行研究，灰绿-深灰色板岩，地质年代为奥陶系，结合水质量分数为0.30%；砖红色间夹灰白色-厚层-粗粒长石石英砂岩，地质年代为白垩系，结合水质量分数为0.01%[20]。采用美国伊诺斯科技有限公司生产的X-衍射仪以及ZSX Primus Ⅱ X荧光光谱仪检测2种压砂砾石的矿物组成，绿色板岩的主要矿物组成为石英（44 %）、云母以及斜长石；红色长石石英砂岩的主要矿物组成为石英（>75 %）2种压砂砾石如图2所示。

a. 绿色板岩压砂砾石
a.Green slate gravel

b. 红色砂岩压砂砾石
b.Red sandstone gravel

图2 宁夏中卫2种压砂砾石
Fig.2 Two kinds of gravel in Zhongwei, Ningxia

本研究采用的压砂砾石样品均采自当地主要压砂地，样品采集过程中选取不同地势、不同区域的压砂砾石，进行混样，确保所收集的压砂砾石具有代表性，同时参照当地压砂地特征，将采集的压砂砾石过10~30 mm筛，确保粒径均一性后，用塑料桶运回实验室分析[21]。试验开始前半个月，用蒸馏水将2种砾石样品冲洗3遍，并放在滤纸上自然风干备用。待砾石样品晾干后，将其随机装入洗净并晾干的有机玻璃筒中，参照当地老乡习惯确定压砂厚度为12 cm，各桶以（1 000±3）g控制砾石装入量。

1.2.2 试验装置

淋溶试验设置在1个5 m×1.2 m×2.5 m的半封闭式自动化模拟操作间，室内主要的增温设备是光暖加热器以及红外线石英辐射灯，同时还设置了风暖加热器以及PTC陶瓷发热元件进行辅助增温，增温设备安装于操作间顶部的中间区域。降温设备为机械控制制冷式电冰箱，用温度传感器插座控制加热制冷设备，达到模拟试验区温度的目的，精度为0.5℃[22]。采用温湿度自动记录仪监测记录温湿度变化过程。同时还采用推杆和往复器连接，结合定时器设置固定时间间隔，实现对模拟操作间的自动化运行，模拟自然环境下的昼夜交替过程。半封闭式自动化模拟操作间布置图如图3所示。

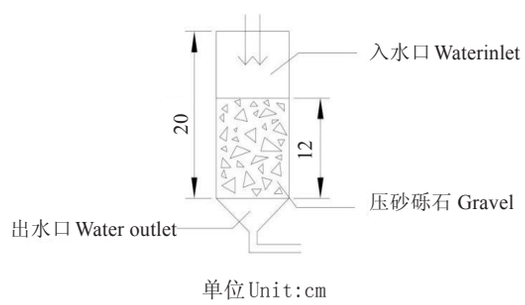


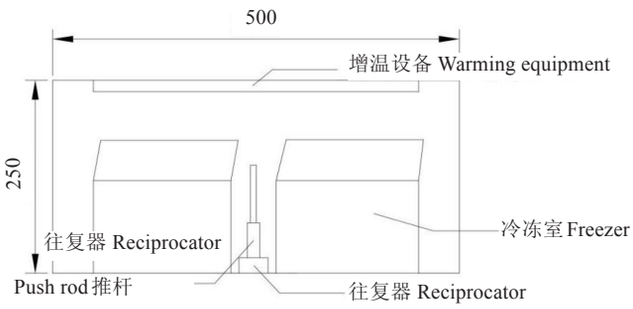
图3 半封闭式自动化模拟操作间布置立面图
Fig.3 Layout of semi-closed automated simulated operating room

1.2.3 试验设计

研究选取宁夏中卫香山地区兴仁堡气象站最近30 a气象资料，以年降水量为依据，通过P-Ⅲ型曲线拟合，并查阅相关规定，确定丰水年（20 %）、平水年（50 %）、枯水年（80 %）3个水平年，并选取2007年、1988年、1986年分别作为丰水年、平水年、枯水年的3个典型年，并以各典型年月降水量控制丰、平、枯这3组模拟试验过程中的补水量[23]。由于当地年降水量较少，且年内分布极为不均，只有通过灌溉补水才能满足当地支柱产业压砂瓜产业的需求，除设置丰、平、枯3个天然降水水平以外，还参照宁夏中卫香山地区以及附近区域的压砂瓜灌溉制度的研究资料并结合当地的灌溉习惯设置了充分灌溉、75 %充分灌溉和非充分灌溉3个水平，共计6个试验水平[24]，每个水平3个重复。宁夏当地压砂地灌溉用微咸水的盐分，模拟压砂地不同盐分条件的灌溉水对砾石元素淋溶的影响，不同盐分水平设置2、3、4、5 g/L的NaCl溶液模拟不同的盐分环境，探索盐分参与对压砂砾石元素淋溶的影响。

淋溶试验通过图4所示的装置进行。根据试验装置尺寸面积和补水量，将其换算为相应体积，用量筒量取蒸

馏水直接倒入有机玻璃桶中，淋溶过程中，水分从入水口进入有机玻璃桶中，对其中的压砂砾石产生淋溶作用，其后淋溶液从出水口排除，在出水口处收集压砂砾石元素淋溶液。取淋溶液存储于塑料储样瓶，冷藏保存以备检测。



单位 Unit: cm

图4 淋溶试验装置

Fig.4 Leaching test device

1.3 观测内容及方法

1.3.1 淋溶液元素检测

1）观测内容：试验前测定2种压砂砾石的元素含量基底值，以期与后期的试验结果进行对照。试验开始后，测定淋溶液的电导率，以及对淋溶液进行全元素检测，检测淋溶元素的种类及含量。

2）测定方法：

检测采用美国安捷伦科技公司生产的ICP-OES Agilent 7700全元素扫描仪、美国赛默科技公司生产的EA-Thermo 2000元素分析仪、IC-Thermo Fisher ICS 5000离子色谱仪（精度0.2×10^{-6}）检测压砂砾石元素淋溶液元素种类及含量。

温度变化采用德国德图仪器有限公司生产的温湿度记录仪进行记录，精度0.1℃。

1.3.2 砾石风化指标计算

目前常用的风化指标有帕克风化指数[25]、威格特残积指数[26]、化学蚀变指数[27]、化学风化指数[28]、斜长石蚀变指数[29]和硅铝比等。这些指标被广泛应用于地表风化产物风化程度的研究中，风化指标计算公式及其判别依据见表1。

表1 风化指标及其计算公式

Table 1 Weathering indices and their calculating formulas

风化指数 Weathering index	计算公式 Computing formula	未风化 Unweathered	完全风化 Complete weathering
帕克风化指数(WIP) Weathering index parker	$100\times(2Na_2O/0.35+MgO/0.9+2K_2O/0.25+CaO/0.7)$	＞100	0
威格特残积指数(V) Vogt residual index	$(Al_2O_3+K_2O)/(MgO+CaO+Na_2O)$	＜1	∞
化学蚀变指数(CIA) Chemical index of alteration	$100\times Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)$	≤50	100
化学蚀变指数(CIA) Chemical index of alteration	$100\times Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O)$	≤50	100
斜长石蚀变指数(PIA) Plagioclase index of alteration	$100\times(Al_2O_3-K_2O)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O-K_2O)$	≤50	100
风化势指数(WPI) Weathering potential index	$100\times(CaO+Na_2O+K_2O-H_2O^+)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O+MgO+SiO_2+Ti_2O)$	＞1	0
硅铝比(SR) Silica-alumina ratio	SiO_2/Al_2O_3	＞4	＜4

化学风化势指数WPI对风化程度、时间和深度的变化都显示出明显的单调性和敏感性，可作为评价岩石风化程度和确定风化深度的依据,选取化学风化指数WPI来定性的描述2种覆砂材料的风化程度。

$$WPI=\frac{100\times(CaO+Na_2O+Cao-H_2O^+)}{CaO+MgO+Na_2o+K_2O+Al_2O_3+Sio_2+Ti_2O} \quad (1)$$

1.3.3 压砂砾石元素淋溶影响因素相对贡献率分析

本试验采用多元回归法分析各影响因子对元素淋溶量的贡献率，利用SPSS软件建立回归方程，对各影响因子数据进行标准化处理，分析各影响因子对元素淋溶量变化的相对贡献率大小。具体计算方法如下：

$$Y=a_1X_1+a_2X_2+a_3X_3...+a_nX_n \quad (2)$$

$$K_i=\frac{a_i}{|a_1|+|a_2|+|a_3|+...+|a_n|} \quad (3)$$

式中Y为淋溶量的标准值，a_1~a_n分别为各个影响因子标准化后的回归系数，X_1~X_n分别为各个影响因子标准化后对应的数值，K_i为某影响因子（X_i）对Y的相对贡献率。

2 结果与分析

2.1 当地2种压砂砾石及其淋溶释放元素组成分析

2种压砂砾石元素组成及含量见表2。由表可知，绿色板岩中含有元素25种，其中金属元素15种，非金属元素10种。O、Si元素含量最高，占砾石元素总量的80%，Fe、Al、K等金属元素次之。红色石英砂岩中含有元素23种，其中金属元素13种，非金属元素10种。同样是O、Si元素含量最高，占砾石元素总量的90%，Ca、C、Cl等非金属元素次之。

压砂地的覆砂材料是地表风化壳的松散碎屑的风化产物，不同覆砂材料其风化程度也不尽相同，风化指数可以很好地反映岩石的风化程度，可通过计算这些风化指数来定性的描述2种压砂砾石的风化程度。根据式（1），绿色板岩的化学风化指数为WPI=18.00，远高于红色砂岩的化学风化指数（WPI=2.70），说明绿色板岩的风化程度要高于红色砂岩。2种压砂砾石的其他风化指标见表3。绿色板岩威格特残积指数为12.85，高于红色砂岩（0.047）；绿色板岩化学蚀变指数为26.37，大于红色砂岩（3.467）；绿色板岩化学风化指数为80.477，大于红色砂岩（3.506）；绿色板岩斜长石蚀变指数为118.56，大于红色砂岩（2.408）；绿色板岩硅铝比为10.977，远小于红色砂岩，即风化程度较高。综上，绿色板岩的风化程度高于红色石英砂岩。

2.2 不同补水量下压砂砾石元素淋溶规律分析

2.2.1 元素淋溶量与水分关系分析

水是自然界最常见也是最广泛的一种溶剂，压砂砾石覆盖在土壤表层，在天然降雨或者人工灌溉的情况下，压砂砾石的元素会随着淋溶作用发生迁移。将2种压砂

砾石在自然状态下与其水分淋溶作用下的元素淋溶量进行对比，结果如表4。补水状态下2种砾石的元素淋溶量明显高于自然状态下，表明水分的参与可以促进压砂砾石的元素淋溶。

表2　绿色板岩、红色砂岩元素组成及含量表

Table 2　Element composition and its content of green slate and red sandstone

元素 Element	质量分数 Content/(mg·kg^{-1}) 绿色板岩 Green slate	红色砂岩 Red sandstone	元素 Element	质量分数 Content/(mg·kg^{-1}) 绿色板岩 Green slate	红色砂岩 Red sandstone
氧 O	497 860.6	52 6505.4	磷 P	686.3	30.7
硅 Si	348 614.5	419 157.8	锰 Mn	472.0	177.8
铁 Fe	42 136.7	3 016.0	溴 Br	208.9	202.7
铝 Al	36 027.8	458.6	钡 Ba	226.2	—
钾 K	29 531.1	217.5	硫 S	213.1	230.2
碳 C	14 800.0	14 800.0	铬 Cr	206.9	15.7
钠 Na	8 463.3	350.0	锌 Zn	122.0	26.2
氯 Cl	6 060.4	7040.4	铜 Cu	93.7	1 185.0
钛 Ti	4 208.0	68.5	锆 Zr	80.4	—
钙 Ca	3 548.2	16 688.8	铅 Pb	39.3	—
氢 H	3 400.0	2 300.0	氟 F	13.5	28.5
氮 N	1 600.0	1 600.0	钴 Co	14.9	—
镁 Mg	1 372.2	5 517.6	钒 V	—	26.6
镍 Ni	—	356.0			

表3　2种压砂砾石风化指标对比

Table 3　Comparison of 2 weathering indices of 2 types of gravels

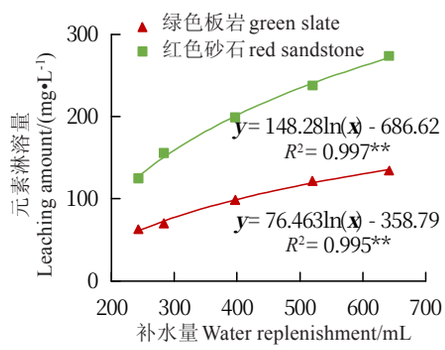
风化指数 Weathering index	绿色板岩 Green slate gravel	红色砂岩 Red sandstone gravel
威格特残积指数 Vogt residual index	12.85	0.047
化学蚀变指数 Chemical index of alteration	26.37	3.467
化学风化指数 Chemical index of weathering	80.477	3.506
斜长石蚀变指数 Plagioclase index of alteration	118.56	2.408
风化势指数 Weathering potential index	18	2.7
硅铝比 Silica-alumina ratio	10.977	1036.93

表4　绿色板岩、红色砂岩补水与自然状态下淋溶元素比较

Fig.4　Comparison of leaching elements in green slate and red sandstone under water replenishment and natural conditions　(mg·L^{-1})

元素 Element	补水状态淋溶量 Leaching amount in replenishment state		自然状态淋溶量 Leaching amount without replenishment state	
	绿色板岩 Green slate gravel	红色砂岩 Red sandstone	绿色板岩 Green slate gravel	红色砂岩 Red sandstone
Ca	40.99	80.00	25.27	46.87
Na	8.53	12.73	4.60	5.29
N	8.24	7.29	3.64	3.81
Mg	3.04	11.89	1.74	5.98
Cl	1.48	12.86	0.96	8.23
Sr	0.42	0.22	0.11	0.10
Al	0.10	0.09	0.05	0.04
P	0.18	0.21	0.04	0.09
Mn	0.35	0.16	0.00	0.00

为了明确压砂砾石元素淋溶量与补水量的函数关系，对不同补水量下2种压砂砾石元素淋溶量进行拟合分析，结果如图5所示。通过拟合方程发现，压砂砾石元素淋溶量与补水量呈对数函数关系，且拟合度较高（R^2>0.99）。在相同补水量下，红色砂岩的元素淋溶量要略高于绿色板岩，其原因可能是红色砂岩的风化程度不高，在水分的参与下，加强了砾石的风化作用与淋洗作用，而绿色板岩的风化程度高，其中的元素可能已经随着之前的风化作用发生迁移或淋失，因此在相同补水量下，红色砂岩的元素淋溶量要略高于绿色板岩。



Note**, P<0.01。

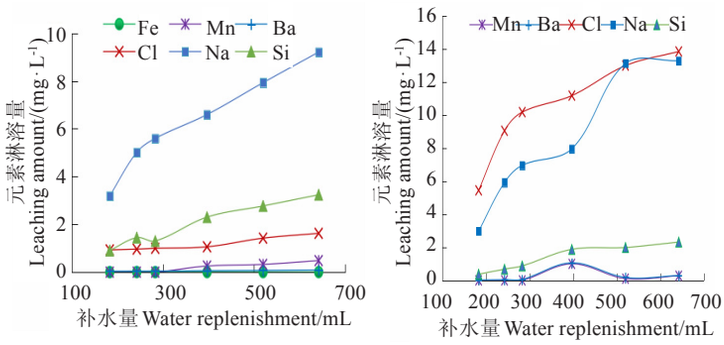
图5　补水量与元素淋溶总量的关系

Fig.5　Relationship between leaching amount of elements and water replenishment

2.2.2 不同补水量下各元素释放量变化分析

作物在生长发育过程中需要不断地从外界吸取养分，根据联合国粮农组织的推荐,作物需要营养元素共16种，其中大量元素有C、H、O、N、P、S、K、Mg、Ca，微量元素有Fe、Mn、Cu、B、Zn、Mo、Cl，有益元素有：Na、Si、Co[30]。这些元素虽然在植株体内的含量有多有少，但各有其独特作用，他们对植物的生长发育起着至关重要的作用，是植物生长过程中必不可少的元素。各元素的水溶性、活动性具有较大差异，在本试验中,不同元素的淋溶量也具有较大的差异。为了深入了解各个元素淋溶量与补水量的关系，分析2种压砂砾石淋溶元素中的微量元素在不同补水条件下的淋溶规律，进行2种压砂砾石微量元素淋溶量试验，其结果如图6所示。

由图6可以看出，绿色板岩淋溶出4种微量元素Fe、Mn、Ba、Cl，随着补水量增加，各元素淋溶量呈增加趋势。其中Cl元素的淋溶量最大。红色砂岩淋溶出3种微量元素Mn、Ba、Cl，其中Cl元素的淋溶量最大。随着补水量增加，Cl元素淋溶量呈波动增加趋势。其中红色砂岩Mn、Ba元素淋溶量在补水量为397 mL时出现峰值，随后淋溶量减小，分析原因认为随着补水量进一步增大，淋溶液被稀释，因此呈现减小趋势。对2种压砂砾石淋溶元素中的有益元素进行分析，发现绿色板岩淋溶出2种有益元素Na、Si，随着补水量的增加，各元素淋溶量呈增加趋势。其中Na元素的淋溶量大。红色砂岩淋溶出2种有益元素Na、Si，同绿色板岩压砂砾石一样，随着补水量增加，各元素淋溶量呈波动性增加趋势。



a. 绿色板岩砾石
a.Green slate gravel

b. 红色砂岩砾石
b.Red sandstone gravel

图6 2种压砂砾石微量元素淋溶量

Fig. 6 Leaching amounts of trace elements in 2 kinds of compressed gravel

于此同时，绿色板岩淋溶微量元素较红色砂岩多1种Fe元素，其原因是绿色板岩原有元素中Fe元素质量分数（42 136.7 mg/kg）远高于红色砂岩原有元素中Fe元素质量分数（3 016.0 mg/kg），使得前者的Fe元素更易淋溶。可见砾石本身的元素含量也会对压砂砾石元素淋溶量产生影响

2.3 不同盐分条件下压砂砾石矿质元素淋溶规律分析

2.3.1 元素淋溶总量与盐分关系分析

微咸水是指含盐量0.2%~0.5%的水或矿化度在2~5 g/L的水[31]，宁夏当地灌溉用微咸水盐分浓度较高，盐分对元素淋溶的影响不可忽略，但微咸水中元素含量较多，为了避免过多外源元素的引入，选用不同矿化度的（2、3、4、5 g/L）NaCl溶液来模拟不同的盐分环境，探索不同水平的盐分环境与压砂砾石元素淋溶的关系。图7为不同矿化度NaCl溶液处理下的元素淋溶量，由图可知，随着矿化度的增加，元素淋溶量呈现先增大后减小的趋势，且在矿化度为3 g/L左右时的NaCl溶液处理下元素淋溶量达到最大值，然后逐渐减小，即当盐分溶液的矿化度在3 g/L左右时，盐分对压砂砾石元素淋溶的影响最小，后随着盐分的增加，其对元素淋溶的抑制作用愈大。曲线拟合结果表明，压砂砾石元素淋溶量与盐分呈3次多项式关系，且拟合度较高。

2.3.2 微量元素淋溶量与盐分关系分析

选取Fe、Mn 2种微量元素分析元素淋溶量与盐分的关系，结果如图8所示。由图可知，随着矿化度的增加，Fe元素和Mn元素淋溶量呈现先增大后减小的趋势，且在3 g/L左右时达到最大值，即当盐分溶液的矿化度在3 g/L左右时，盐分对压砂砾石元素淋溶的影响最大，后随着盐分的增加，其对元素淋溶的抑制作用

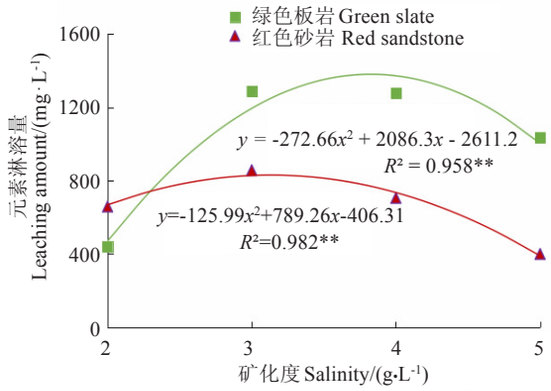
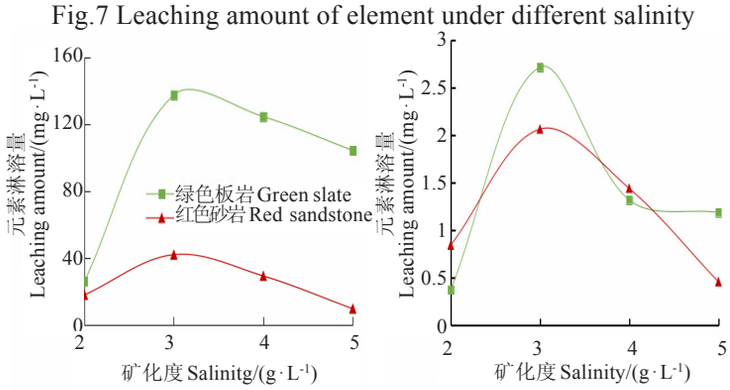


Fig. 7 Elemental leaching amount under differentsalinity

图7 不同矿化度盐分下元素淋溶量

Fig.7 Leaching amount of element under different salinity



a. Fe

b. Mn元素

图8 Fe、Mn元素在不同盐分处理下淋溶量

Fig.8 Leaching amount of Fe and Mn elements under different salt treatment

愈大。在相同盐分条件下，绿色板岩的元素淋溶量略高于红色砂岩，这可能是由于绿色板岩风化程度较高，其内部的孔隙结构较多，在盐分的盐蚀作用下，盐蚀作用的接触面积更大，风化加剧，元素淋溶量增大。

2.4 压砂砾石元素淋溶影响因素相对贡献率分析

影响元素淋溶量的因素有补水量、温度、盐分等。为了明确各种影响因素在淋溶过程中对元素淋溶量影响的大小，采用多元回归法分析各影响因子对元素淋溶量变化的影响，运用SPSS软件进行多元回归分析，得到多元回归方程拟合优度评价指标R^2=0.976，认为此多元回归模型可以较好的适用于分析宁夏中卫地区各影响因子对元素淋溶量的相对贡献率。根据式（2）得出2种砾石的拟合方程如下：

$$Y_L=5.699X_w-6.51X_t-1.19X_s \quad (4)$$

$$Y_H=4.862X_w-4.726X_t-1.701X_S \quad (5)$$

式中Y_L表示绿色板岩压砂砾石元素淋溶量的标准值，Y_H表示红色砂岩压砂砾石元素淋溶量的标准值。用K_w、K_t、K_s分别表示补水量、温度、盐分影响因子对淋溶量的贡献率，各影响因子对元素淋溶量的相对贡献率如表5所示，温度和补水量对绿色板岩元素淋溶的影响最大，相对贡献率分别为42.5%、48.6%，盐分次之；温度和补水量对红色砂岩元素淋溶的影响最大，相对贡献率分别为43.0%、

41.9%，盐分次之。可见水分、温度对压砂砾石元素淋溶的影响极大。因此剔除盐分因素，选择补水量与温度2个因素进一步探索对压砂砾石元素淋溶的影响。

表5　各影响因子对元素淋溶量的相对贡献率

Table 5　Relative contribution rates of influencing factors to leaching amount of elements

影响因子 Influential factor	公式 Formula	贡献率 Contribution rate/%	
		绿色板岩 Green slate gravel	红色砂岩 Red sandstone grave
补水量 Water replenishment	式(4)、式(5)	42.5	43.0
	式(6)、式(7)	99.4	79.2
温度 Temperature	式(4)、式(5)	48.6	41.9
	式(6)、式(7)	0.6	20.8
盐分 Salinity	式(4)、式(5)	8.9	15.1
	式(6)、式(7)	----	----

运用SPSS软件进行多元回归分析，得到多元回归方程拟合优度评价指标R^2=0.982，故认为此多元回归模型可以较好地适用于分析补水量、温度影响因子对元素淋溶量的相对贡献率。根据式(2)拟合方程如下：

$$Y_L=0.996X_w+0.006X_t \quad (6)$$

$$Y_H=1.240X_w+0.326X_t \quad (7)$$

式中Y_L表示绿色板岩压砂砾石元素淋溶量的标准值，Y_H表示红色砂岩压砂砾石元素淋溶量的标准值。

表5中，在剔除盐分因素下，补水量对绿色板岩元素淋溶的影响最大，相对贡献率为99.4%，温度次之，相对贡献率为0.6%；同样地，补水量对红色砂岩元素淋溶的影响最大，相对贡献79.2%，温度次之，相对贡献率为20.8%。可见补水量对压砂砾石元素淋溶的影响大于温度的影响。

通过以上的拟合以及相对贡献率的计算，可以发现，影响宁夏中卫地区元素淋溶量影响因子(补水量、温度、盐分)中，补水量对其元素淋溶量的影响最大，温度次之，盐分最小。即对宁夏中卫地区元素淋溶量的影响大小的因子依次为：补水量＞温度＞盐分。

3　结论与讨论

本文针对宁夏中卫香山地区压砂地元素淋溶问题，以当地2种主要压砂砾石(绿色板岩、红色砂岩)为研究对象，在了解当地气象环境因素和灌溉习惯的基础上，通过室内模拟试验，设置了不同补水和盐分水平，观测不同补水水平以及盐分水平下，宁夏当地2种压砂砾石在水分参与下的元素淋溶规律，主要得到以下结论：

1)水分的参与对压砂砾石元素淋溶有促进作用。随着补水量的增加，绿色板岩各元素淋溶量呈波动增加趋势，红色砂岩Na、Si、Cl元素淋溶量随补水量的增加逐渐增大，Mn、Ba元素淋溶量在补水量为397 mL时出现峰值，随后淋溶量减小，分析原因认为随着补水量进一步增大，淋溶液被稀释，因此呈现减小趋势。通过拟合方程发现压砂砾石元素淋溶量与补水量呈对数函数关系

2)随着矿化度的增加，元素淋溶量呈现先增大后减小的趋势，且在矿化度为3 g/L左右时的NaCl溶液处理下元素淋溶量达到最大值，然后逐渐减小，即当盐分溶液的矿化度在3 g/L左右时，盐分对压砂砾石元素淋溶的影响最小，后随着盐分的增加，其对元素淋溶的抑制作用越来越大。且通过拟合方程发现，压砂砾石元素淋溶量与盐分呈2次多项式关系。

3)影响宁夏中卫地区元素淋溶量影响因子(补水量、温度、盐分)中，补水量对其元素淋溶量的影响最大，温度次之，盐分最小。即对宁夏中卫地区元素淋溶量的影响为：补水量＞温度＞盐分。

压砂砾石淋溶元素会随着天然降水或者灌溉进一步下渗进入土壤，可能对压砂地原有的土壤体系产生影响。在本试验条件下，压砂砾石元素淋溶量随着补水量的增加呈波动增加趋势，这是由于水分能够深入砾石内部的裂隙结构，加强砾石内部的风化作用和淋洗作用，使砾石元素淋溶量增大。在补水量相同时，随着盐分的增加，压砂砾石元素淋溶量先增大后减小，在3 g/L左右时元素淋溶量最大。3 g/L以下的盐分环境中，可能会导致压砂砾石的盐蚀作用加强，风化加剧，从而使元素淋溶量增大。而大于3 g/L的盐分溶液离子浓度较高，元素的溶解度降低，元素淋溶量波动性减小。

本试验选取的2种压砂砾石粒径均为10~30 mm，考虑粒径过小的压砂砾石覆盖在土壤上，并不能有效阻断土壤的毛细管作用，起到抑制蒸发的作用，而粒径过大的压砂砾石不方便于耕作种植，且其比表面积各不相同，可能会对元素淋溶量产生一定影响。

本试验研究了压砂砾石元素淋溶，并没有将压砂地土壤和元素淋溶结合起来。为了进一步了解元素淋溶对压砂地土壤发育以及种植作物的影响，在今后的研究过程中，可将压砂砾石元素淋溶过程和压砂地土壤环境以及压砂地特色作物种植联系起来，通过大田实际试验进一步探索压砂地元素淋溶对土壤环境和对植株生长发育的影响。

[参 考 文 献]

[1] 马波，田军仓，沈晖，等.压砂地西瓜光合作用干物质及产量水氮耦合模型及验证[J].农业工程学报，2016，32(20)：129—136.
Ma Bo, Tian Juncang, Shen Hui, et al. Water-nitrogen coupling model and validation of photosynthetic dry matter and yield of watermelon in sandy land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32 (20):129—136.(in Chinese with English abstract)

[2] 赵文举，李晓萍，范严伟，等.西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J].农业工程学报，2015，31(17)：144—151.
Zhao Wenju, Li Xiaoping, Fan Yanwei, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in sandy land in arid northwest China [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31 (17): 144—151.(in Chinese with English abstract)

[3] 马波，田军仓.基于生理发育时间的压砂地西瓜发育动态模型及验证[J].农业工程学报，2016，32(20)：122—128.
Ma Bo, Tian Juncang. Dynamic model and validation of watermelon development in sandy land based on physiological development time [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016,32(20): 122—128.

[4] 赵文举，李晓萍，范严伟，等.西北旱区压砂地土壤水分入渗规律研究[J].土壤通报，2016，47(1)：150—155.
Zhao Wenju, Li Xiaoping, Fan Yanwei, et al. Study on soil Water infiltration law of sand compressed land in northwest dry region

[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 150—155. (in Chinese with English abstract).

[5] 宋建树.压砂地土壤特性及水分变异规律研究[D].兰州:兰州理工大学,2014.
Song Jianshu. Study on Soil Characteristics and Water Variability of Sandy Compressed Land [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)

[6] 徐强,强力,吴宏亮,等.砂田水热及减尘效应研究[J].宁夏大学学报:自然科学版,2009,30(2)180—182
Xu Qiang, Qiang Li, Wu Hongliang, et al. Study on hydrothermal and dust reduction effects in sandy fields[J]. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2009, 30 (2): 180—182. (in Chinese with English abstract)

[7] 王金牛,谢忠奎,郭志鸿,等.砂田退化对土壤温度和蒸发影响的模拟研究[J].中国沙漠,2010,30(2):388—393.
Wang Jinniu, Xie Zhongkui, Guo Zhihong, et al. A simulation study on the effects of sand degradation on soil temperature and evaporation [J]. Journal of Desert Research, 2010,30(2): 388—393.

[8] 逄蕾,路建龙,周茅先,等.砂龄对砂田土壤微生物区系及理化性状的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):185—192.
Pi Lei, Lu Jianlong, Zhou Maoxian, et al. Effects of sand age on soil microflora and physical and chemical properties in sandy fields [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35 (4): 185—192. (in Chinese with English abstract)

[9] 商放泽,杨培岭,李云开,等.不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J].农业工程学报,2012,28(7):103—110.
Shang Fangze, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Effects of different nitrogen application levels on soil nitrogen leaching and accumulation in deep aerated zone [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28 (7): 103—110. (in Chinese with English abstract)

[10] 冯志刚,刘炫志,韩世礼,等.碳酸盐岩风化过程中高场强元素的地球化学行为研究:来自碳酸盐岩淋溶实验的证据[J].中国岩溶,2018,37(3):315—329.
Feng Zhigang, Liu Xuanzhi, Han Shili, et al. Geochemical behavior of high field intensity elements in weathering process of carbonate rocks: evidence from leaching experiments of carbonate rocks [J]. Carsologica Sinica, 2018,37(3): 315—329. (in Chinese with English abstract)

[11] 王丹.大连地区红色风化壳地球化学元素和石英颗粒表面特征分析[D].大连:辽宁师范大学,2018.
Wang Dan. Analysis of Geochemical Elements and Quartz Grain Surface Characteristics of Red Weathering Crust in Dalian Area [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2018. (in Chinese with English abstract)

[12] 张楠,范春楠,陈思羽,等.次生落叶阔叶林降雨过程中的4种金属元素特征[J/OL].南京林业大学学报:自然科学版:1-10.[2019-04-28].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20190416.1007.002.html.
Zhang Nan, Fan Chunnan, Chen Siyu, et al. Characteristics of four metal elements in the rainfall process of secondary deciduous broad-leaved forest [J/OL]. Journal of Nanjing Forestry University. Natural Sciences Edition:1-10.[2019-04-28].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20190416.1007.002.html.(in Chinese with English abstract).

[13] 李王成,赵研,王霞,等.冻融循环下不同水质对压砂砾石元素淋溶影响研究[J/OL].排灌机械工程学报,2019.[2019-04-09].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190304.1527.002.html.
Li Wangcheng, Zhao Yan, Wang Xia, et al. Influence of different water quality on element leaching of sand gravel under freeze-thaw cycles[J/OL]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019. [2019-04-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190304.1527.002.html. (in Chinese with English abstract)

[14] 张晴.粉煤灰复垦土壤中重金属元素的淋溶实验研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
Zhang Qing. Experimental Study on Leaching of Heavy Metals from Reclaimed Soils with Fly Ash [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)

[15] 周福来,蔡昌凤,龚萧,等.保兴埠(芜湖)底泥重金属污染现状研究[J].安徽工程科技学院学报:自然科学版,2006(2):16—18.
Zhou Fulai, Cai Changfeng, Gong Xiao, et al. Study on the heavy metal pollution in the sediment of Baoxing ridge (Wuhu) [J]. Journal of Anhui Polytechnic University: Natural Science Edition, 2006 (2): 16—18. (in Chinese with English abstract)

[16] 冯志刚,刘炫志,韩世礼,等.碳酸盐岩风化过程中高场强元素的地球化学行为研究:来自碳酸盐岩淋溶实验的证据[J].中国岩溶,2018,37(3):315—329.
Feng Zhigang, Liu Xuanzhi, Han Shili, et al. Geochemical behavior of high field intensity elements in the weathering process of carbonate rocks: Evidence from leaching experiments of Carbonate Rocks [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37 (3): 315—329.

[17] 马中昇,谭军利,马小福,等.不同种植年限对压砂地土壤盐分及西瓜产量的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(11):1200—1204.
Ma Zhongsheng, Tan Junli, Ma Xiaofu, et al. Effects of different planting years on soil salinity and watermelon yield in sandy compressed land [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36 (11): 1200—1204.

[18] 戚鹏程,赵传燕,冯兆东,等.干旱荒漠区土地利用变化对地表温度的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):310-316,386.
Qi Pengcheng, Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, et al. Effects of land use change on land surface temperature in arid desert area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26 (11): 310-316,386. (in Chinese with English abstract)

[19] 谭军利,王西娜,田军仓,等.不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):100—108.
Tan Junli, Wang Xina, Tian Juncang, et al. Effects of sand cover on soil water and salt transport under different brackish water irrigation conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34 (17): 100—108.(in Chinese with English abstract).

[20] 李王成,王霞,刘明安,等.压砂砾石水-岩作用下元素释放规律[J].排灌机械工程学报,2018,36(10):995—999.
Li Wangcheng, Wang Xia, Liu Ming'an, et al. The law of element release under the action of water-rock compaction [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36 (10): 995—999.(in Chinese with English abstract).

[21] 李王成,董亚萍,李晨,等.不同环境条件下板岩中必需元素释放规律研究[J/OL].排灌机械工程学报:1—7.[2019-04-09].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190108.1004.002.html.
Li Wangcheng, Dong Yaping, Li Chen, et al. Law of necessary elements release of slate gravel under different environments[J/OL]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering: 1—7. [2019-04-09]. http://kns. cnki. net / kcms / detail / 32.1814. TH.20190108.1004.002.html.(in Chinese with English abstract)

[22] 王霞.宁夏中卫地区压砂砾石元素淋溶规律模拟实验研究[D].银川:宁夏大学,2018.
Wang Xia. A Simulation Study on the Leaching Law of Elements in Compacted Gravel in Zhongwei Area of Ningxia [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018. (in Chinese with English abstract)

[23] 郭晓雷，张磊，缑晓晖，等.宁夏压砂瓜种植区霜冻气候基本特征及变化趋势[J].中国农学通报，2015，31(28)：184—189.
Guo Xiaolei, Zhang Lei, Xu Xiaohui, et al. Basic characteristics and trends of frost climate in Ningxia sand-pressing melon planting area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31 (28): 184—189.Chinese with English abstract）

[24] 黄山松，沈晖，田军仓，等.水分亏缺对旱区压砂瓜光合特性及产量的影响[J].北方园艺，2017(15)：1—6.
Huang Shansong, Shen Hui, Tian Juncang, et al. Effects of water deficit on photosynthetic characteristics and yield of sandmelon in arid areas [J]. Northern Horticulture, 2017 (15): 1—6. (in Chinese with English abstract)

[25] Harris J E. Weathering of rock, corrosion of stone and rusting of iron[J]. Meccanica, 1992, 27(3):233—250.

[26] Miscevie P, Vlastelica G. Impact of weathering on slope stability in soft rock mass[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(3):240—250.

[27] Zuo S, Yang J, Huang L, et al. Assessment of plant-Driven mineral weathering in an aggrading forested watershed in subtropical china[J]. Pedosphere, 2016, 26(6):817—828

[28] Ni S, Ju Y, Hou Q, et al. Enrichment of heavy metal elements and their adsorption on iron oxides during carbonate rock weathering process[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(9):1133—1139

[29] Kharuk V I, Morgun V N, Theisen A F, et al. Some aspects of chlorophyll fluorescence application in remote sensing[C]// International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 1994.

[30] 王学军，邓宝山，张泽浦.北京东郊污灌区表层土壤微量元素的小尺度空间结构特征[J].环境科学学报，1997(4)：27—31.
Wang Xuejun, Deng Baoshan, Zhang Zepu. Small-scale spatial structure characteristics of trace elements in surface soil of sewage irrigation area in eastern suburbs of Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997 (4): 27—31. (in Chinese with English abstract)

[31] 张璐瑶，沈晖，姚自凯，等.不同矿化度微咸水灌溉对压砂地欧李光合作用及产量品质的影响[J].节水灌溉，2018(12)：44—48.
Zhang Luyao, Shen Hui, Yao Zikai, et al. Effects of brackish water irrigation with different salinity on photosynthesis, yield and quality of Prunus humilis in sandy compacted land [J]. Water Saving Irrigation, 2018 (12): 44—48(in Chinese with English abstract).

Influencing factors of element leaching of compressed gravel in Ningxia

Li Wangcheng [1,2,3], Zhao Yan [1], Wang Shuai[1], Tian Juncang [1,2,3], Wang Xia [1], Wang Shuangtao [1], Li Chen [1], Wang Xing [1], Dong Yaping [1]

(1. *College of Civil and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*; 2. *Engineering Research Center of Water Saving Irrigation and Water Resources Regulation and Control, Yinchuan* 750021, *China*; 3. *Engineering Research Center of the Ministry of Education for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Dry Areas, Yinchuan* 750021, *China*)

Abstract: Studying the elemental leaching of gravel in the sand soil is very important for the maintenance and healthy development of the soil in Xiangshan area，Zhongwei，Ningxia province. The test site was located in Xiangshan Township, Zhongwei, Ningxia province (36°06′N and 105°15′E). In order to study the rule of elemental leaching of sand land under different water supply, salt treatment and temperature, the elements contents of 2 kinds of gravels were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). In the experiment, 2 kinds of sand gravels were studied in Zhongwei, Ningxia grey green deep gray slate, and gray red thick coarse-grained quartz feldspar sandstone. Leaching test was in a semi-closed automated simulation operation room of 5 m×1.2 m×2.5 m. According to the recent 30-year meteorological data at the weather station in Xiangshan District, Zhongweiand meteorological temperature and water quality data, the effects of water, salinity and temperature on elemental leaching of gravel were studied. Based on the annual precipitation, through P-III curve fitting results, the 3 level years of high water year (20%), flat water year (50%) and low water year (80%) are determined, and the three kinds of hydraulic typical years of high water year, flat water year and low water year were selected in 2007, 1988 and 1986 respectively, and the monthly precipitation of each typical year was used to control the water replenishment in simulation experiments. According to the research data of the water melon irrigation system in Xiangshan District of Ningxia and the nearby area combined with the local irrigation habits, 3 levels of adequate irrigation, 75% full irrigation and inadequate irrigation were set up, with a total of 6 experimental levels, 3 replicates at each level. The contribution rate of each influencing factor to elemental leaching was analyzed by multiple regression method. The results showed that: 1) With the increase of water replenishment, the leaching amount of elements in green slate fluctuated and increased. The leaching amount of elements Na, Si and Cl in red sandstone increased with the increase of water replenishment. The leaching amount of elements Mn and Ba peaked at 397 mL of water replenishment, and then decreased. The reason was that the leaching solution was diluted with the further increase of water supply, so the leaching solution tended to decrease. The fitting equation showed that the gravel leaching amount of elements had a logarithmic function with the amount of water replenishment, and the fitting degree was high (R2 higher than 0.99). 2) With the increase of salinity, the amount of element leaching increased first and then decreased, and reached the maximum under NaCl solution treatment when salinity was about 3 g/L, then decreased gradually. Through fitting equation, we found that the leaching amount of elements in gravel had a quadratic polynomial relationship with salinity. 3) Among the influence factors of element leaching amount in the Zhongwei area, the amount of water supplement had the greatest influence on the leaching amount of elements, followed by the lowest temperature and the lowest salinity. In Zhongwei area, the influence of leaching amount of elements in gravel was the highest by water supply, followed by temperature and salinity. The research can provide valuable information for healthy development and sustainable utilization of sandy soil.

Keywords:gravels; elements; leaching; salinity; water supply