

ЛИЛКО ДОСПАТЛИЕВ*, ИВАН Т. ИВАНОВ*¹, БОЯНА ПЪРВАНОВА*,
НЕДЯЛКО КАТРАНДЖИЕВ**, ПЕНКА ВЪЛКОВА*

*Тракийски университет, Стара Загора

**Университет по хранителни технологии, Пловдив

¹E-mail: ivanov_it@gbg.bg

Приложение на диелектричната спектроскопия за анализ на въздушно изсушени почви

Dielectric Spectroscopy Analysis of Air-Dried Soils from Plovdiv District, Bulgaria

L. Dospatliev, I. T. Ivanov*, B. Parvanova*, N. Katrandzhiev**, P. Valkova**

**Thracian University, Stara Zagora, Bulgaria*

**University of Food Technologies, Plovdiv, Bulgaria*

Abstract

Measurements of the electric conductivity, σ , and relative dielectric permittivity, ϵ_r , were conducted (0.1 Hz – 15 MHz) on 40 air-dried soil probes that were subsequently analyzed for pH, iron and heavy metal concentrations and organic matter. The pH of soil probes varied between pH 5.25 and pH 7.73 (mean pH 6.70), the humus content varied between 1.07% and 2.46% (mean 1.82%). The mean content of Fe was 3.4%, which was 87 fold higher than the mean concentration of the heavy metals (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu и Zn). We found a moderate linear relation between σ (1 MHz) and the indicated physicochemical parameters; pH (coefficient of correlation, $r = 0.58$), iron concentration ($r = 0.44$), content of humus ($r = 0.37$) and heavy metal concentration ($r = 0.53$). Similar relationships and correlation coefficients were found between ϵ_r (10 kHz) and the same physicochemical parameters. As the latter represent general biogeochemical parameters, our findings suggest that dielectric spectroscopy may provide useful approach in probing soil geochemistry and iron cycling. Furthermore, our results yield insights into the impact of various physicochemical parameters on the induced polarization of soils.

Key words: dielectric spectroscopy, soil, humus, pH, Fe_2O_3 , conductivity, relative permittivity

Почвите са сложно устроени смеси от минерални частици и органично вещество, разделени от пори, чийто форма и размери зависят от условията на почвеното формиране. Водата и металните соли са друг важен компонент на почвите. Под 50 MHz честотната зависимост на диелектричната проницаемост (ϵ) и специфичната проводимост σ на почвите зависи силно от водното съдържание (Cihlar and Ulaby, 1974; Torp, 1980; Gadani and Vyas, 2008) и типа на почвата (Roth et al., 1990). Влиянието на ме-

талните соли върху диелектричните параметри на почвата обаче са слабо проучени. В силно овлажнени и богати на органично вещество Блатни почви е намерена силна зависимост на тяхната индуцирана поляризуемост от съдържанието на желязо (Mansoor and Slater, 2007).

Целта на настоящата работа беше при голям брой въздушно изсушени проби от обработваеми почви да се проучи връзката между диелектричните свойства и някои основни физикохимични параметри на почвите.

Материал и методи

Реактиви. Реактивите са с квалификация „чист за анализ“. Изходните стандартни разтвори за определянето на Fe са с концентрация 1000 mg/l, закупени от Merck, Германия. При всички процедури е използвана двойно-дестилирана вода.

Почвени проби. В изследването са включени 5 основни района от Централната част на Южна България (гр. Асеновград, Пазарджик, Пловдив, Първомай и Стара Загора). Пробовземането е извършено в съответствие с БДС 17.4.55.01-85 (1985), като са определени общо 40 постоянни площадки с площ по 100 m². От всяка площадка са вземани по 3 единични проби по дълбочина на орния слой (0 – 30 cm). Средната проба е приготвяна на място чрез смесване и хомогенизиране на единичните проби и е съхранявана в затворени стъклени съдове за анализ в лабораторни условия.

Определяне на рН и на органичното вещество (хумус) на почвите. рН на почвата е определяно чрез стъклен електрод в суспензия, съдържаща почва и вода в съотношение 1: 5 съгласно БДС ISO 10390 (2002). При определяне съдържанието на органично вещество е следвана процедурата, описана в БДС ISO 14235 (2002).

Минерализиране на пробите. Извършена е по методиката EPA Method 3052 (1996). Претегля се 1 g въздушно суха почва с точност до 0,001 g в PTFE съдове. Прибавят се HNO₃, HF, HCl и H₂O₂, като е използвана микровълнова система Milestone 1200 MEGA с ротор 10 MRD 300 (10 позиции). Максималната мощност е 1000 W, а максималното налягане в тefлоновите съдове – 30 бара.

Определяне съдържанието на желязо в почвите. При определяне съдържанието на Fe в почвените проби е използван атомно-абсорбционен спектрометър “Spektra AA 200” на фирма “Varian”, Австралия, пламъков вариант, при дължина на вълната за Fe – 248,3 nm.

Определяне на пасивните електрични свойства на почвите. Съпротивлението R (Ohm) и капацитивността C (F) на всяка почвена проба се измерват след поставяне на пробата между два електрода, включени в кондуктометрична кювета. Между електродите се пропуска синусоидален електричен ток с известна честота f (Hz) и чрез импедансо-

мер се мери напрежението на електродите и фазовата разлика между тока и напрежението. От тях, на основата на подходящ модел, се определят R и C на пробата. За нашия случай на слабопроводяща почва най-подходящ е моделът от успоредно свързани резистор и кондензатор.

Стойностите на R и C обаче зависят от геометрията на електродите, по-точно от константата на кондуктометричната кювета $K = d/S$, където S е площта на електродите и d е разстоянието между тях. По-удобно е, ако вместо R и C се използват величините специфична електрична проводимост σ (mS/m) и относителна диелектрична проницаемост (ϵ_r), които описват специфичните електрични свойства на пробата и не зависят от електродната конфигурация. (ϵ_r) е безразмерна величина, отразяваща концентрацията на свързаните заряди в пробата и тяхната склонност да се разделят под влияние на външно електрично поле. (σ) е мярка за загубата на енергия (превръщане на електричната енергия в топлина) при протичане на тока през изследваната проба. При ниски честоти дисипацията на енергия зависи от концентрацията на свободните заряди и на тяхната способност да се движат под действие на електричното поле, докато при високи честоти главно влияние оказват диелектричните загуби, дължащи се на електричните диполи. Съгласно (Davey et al., 1992) σ и ϵ_r се пресмятат от уравнения (1) и (2)

$$\epsilon_r = K \cdot C / \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\sigma = K / R \quad (2),$$

където $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (F/m⁻¹) е диелектричната проницаемост на вакуума.

При измерването са използвани почвени проби в насипно състояние, предварително изсушени и раздробени до приблизително еднакъв размер на частиците. Кондуктометричната кювета имаше форма на цилиндър с обем 4,5 ml и диаметър 17 mm. Единият електрод на кюветата съвпада с оста на цилиндъра, а другият – с неговата стена. Съпротивлението R и капацитетът C на кюветата бяха измервани при напрежение 1000 mv и голям брой честоти в интервала 0,001 Hz – 5 MHz с импедансомер Solartron 1260A Impedance/Gain-phase analyzer (Англия), свързан с компютър.

За честоти, по-малки от 1 MHz константата на кондуктометричната кювета имаше стой-

ност $K = 1,55 \text{ cm}^{-1}$ и е изчислена от уравнение (2) чрез измерване на съпротивлението на кюветата след нейното запълване с физиологичен разтвор, чиято проводимост е известна. След измерване на съпротивлението R на пробата нейната проводимост σ е изчислявана по формула $\sigma = K/R$. ϵ_r за отделните проби е пресмятана по формулата $\epsilon_r = C/C_0$, където C и C_0 са капацитетът на кондуктометричната кювета, запълнена с проба и въздух, съответно. C_0 на празната кювета е коригирана спрямо диелектричната проницаемост на дестилираната вода, $\epsilon_r = 80$.

Като контролна среда, несъдържаща органичен материал, е използван фин морски пясък от брега на Балтийско море (Полша), подложен на пълно минерализиране чрез топлинна обработка ($300 \text{ }^\circ\text{C}$, 15 min), измиване с дестилирана вода и изсушаване.

Сертифицирани почви. За оценка на точността на измерванията са използвани следните сертифицирани почвени образци, отговарящи на два широко разпространени в България типа почви:

Светла Алувиално-делувиална ливадна почва ПС-1, СООМЕТ № 0001-1999 ВГ, СОД № 310а 98.

Светла Ливадно-канелена почва ПС-2, СООМЕТ № 0002-1999 ВГ, СОД № 311а 98.

Светла Алувиално-делувиална ливадна почва ПС-3, СООМЕТ № 0003-1999 ВГ, СОД № 312а 98.

Почвите са атестирани на държавно и международно ниво и вписани с номера.

Статистическата обработка на резултатите. При статистическата обработка на данните е използвана програмата SPSS (Statistical package for social sciences) за Windows. Коефициентът на корелация и средните стойности са пресмятани с програмата Microsoft Office Excel.

Резултати и обсъждане

В табл. 1 са показани измерените стойности на някои от основните физикохимични параметри – рН, съдържание на хумус, Fe_2O_3 и общо съдържание на тежки метали (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu и Zn) на изследваните въздушно изсушени почвени проби. Реакцията на почвените проби е в границите от средно кисела (рН 5,25) до леко алкална (рН 7,73) при средна

стойност рН 6,70. Съдържанието на хумус е в границите от 1,07 до 2,46% (ниско до средно). Средната стойност е 1,82%, тъй като по-голямата част от почвите са с ниско съдържание на хумус. Средното съдържание на желязо в сухите проби от почва е 3,4%, което е 87 пъти по-висока стойност в сравнение със средната стойност на сборната маса на останалите тежки метали (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu и Zn).

Регресионно-корелационният анализ показва, че посочените параметри на почвите оказват много слабо влияние помежду си. Получените коефициенти на корелация са показани в табл. 2 и имат ниски стойности. Единствено статистическа значимост е установена за влиянието на съдържанието на тежки метали върху рН на почвите: $r = 0,37$ и коефициент на детерминация $R^2 = 0,14$ при статистическа достоверност $p < 0,05$. Получените резултати са в съответствие с данните, посочени в други литературни източници (Comas et al., 2004; Wu et al., 2005; Chadwick et al., 2006).

Апаратурата за измерване на диелектричните параметри на почвените проби беше калибрирана чрез използване на материали с известни параметри. За dH_2O ϵ_r имаше стойност около 80 (10 kHz – 5 MHz) и се менеше между 3,5 и 4,0 за минерализирания пясък и между 2,5 и 4,0 – за отделните минерализирани почви (500 Hz – 5 MHz). За всяка една от изследваните почвени проби ϵ_r монотонно нарастваше, а σ монотонно намаляваше при намаление на честотата от 5 MHz до 1 Hz. Тези данни се съгласуват с резултатите на други автори (Fano and Trainotti, 2001; Curtis, 2001) и подчертават достоверността на използвания диелектроскопичен метод за изследване на почвените проби в нашите условия. В табл. 1 за всяка почвена проба са показани и стойностите на ϵ_r и σ , определени при избраната честота на тока.

На фиг. 1 е показана диаграмата на разпределение на двойките стойности ϵ_r (10 kHz)–рН за изследваните почвени проби. Графиката показва наличие на слаба линейна зависимост между диелектричната проницаемост ϵ_r (10 kHz) и рН на почвените проби. Подобен линеен вид графично разпределение беше получено и в останалите случаи, когато се търсеше връзка между посочените основни физикохимични параметри и диелектричните свойства – ϵ_r и σ на почвените проби (не е по-

Таблица 1. Основни физикохимични данни на изследваните почвени проби
 Table 1. Principal physicochemical data collected for the soil probes under study

Проба	Тип почви по ФАО	pH	Хумус, %	ϵ_r , 10 kHz	σ (S/cm), 1 MHz	Fe ₂ O ₃ mg.kg ⁻¹	Всички тежки метали, mg.kg ⁻¹	
1	Наносни почви	7,30	2,43	11,3	1,05E-05	49700	845,7	
2		7,36	2,44	14,17	1,38E-05	46800	948,2	
3		7,28	2,45	10,53	5,72E-06	29600	600,9	
4		7,31	2,46	12,99	7,78E-06	68800	1055,4	
5		7,48	1,15	10,81	6,67E-06	50900	1121,0	
6		7,54	1,16	11,26	7,64E-06	37100	802,6	
7	Плитки почви	6,41	1,81	11,04	8,76E-06	38400	349,2	
8		6,32	2,21	10,45	8,42E-06	45200	404,0	
9		6,11	1,55	10,15	7,72E-06	44300	411,8	
10		6,37	2,33	10,56	9,48E-06	37000	303,4	
11	Смолници	5,55	2,35	10,36	9,20E-06	51900	298,0	
12		5,30	2,34	7,64	2,72E-06	49600	519,5	
13		5,34	2,23	9,16	5,14E-06	53400	280,3	
14	Канелени почви	6,11	2,31	9,75	7,47E-06	42200	197,7	
15		7,59	2,03	11,66	1,33E-05	31500	196,9	
16		6,72	1,71	10,18	9,26E-06	47600	268,6	
17		6,68	1,68	9,72	9,11E-06	27900	213,1	
18		6,61	2,09	11,04	1,10E-05	45100	223,5	
19		6,42	2,12	10	9,03E-06	45400	325,4	
20		6,54	2,37	9,35	7,21E-06	53900	314,4	
21		6,50	2,19	10,19	9,01E-06	55000	388,7	
22		Плитки почви	5,82	2,04	4,02	7,76E-07	19800	446,5
23	5,76		1,79	5,45	1,79E-06	22700	149,6	
24	5,25		1,69	4,12	9,95E-07	22900	132,9	
25	6,05		1,39	7,25	3,47E-06	55900	165,7	
26	6,98		1,39	8,67	3,85E-06	58100	225,4	
27	6,09		1,51	7,19	3,33E-06	58100	385,2	
28	6,79		1,14	5,26	1,88E-06	41500	142,7	
29	5,71		1,22	5,27	1,68E-06	46300	163,9	
30	6,66		1,39	5,39	1,90E-06	39300	114,2	
31	7,70		1,07	7,48	3,64E-06	32800	181,8	
32	7,68		1,63	11,3	6,86E-06	42500	538,9	
33	7,73		1,25	6,81	2,74E-06	36400	222,3	
34	Смолници		7,41	1,41	9,37	5,66E-06	45700	555,3
35			7,00	2,14	13,18	6,19E-06	61500	272,5
36		7,01	1,83	14,2	7,18E-06	62200	316,1	
37		6,99	2,16	11,2	6,06E-06	53700	341,9	
38		7,58	1,53	11,21	5,38E-06	42800	599,6	
39		7,68	1,58	12	6,49E-06	42400	279,9	
40		7,70	1,58	12,07	5,96E-06	38200	207,5	
Мах стойност		7,73	2,46	14,20	1,38E-05	68800	1121,0	
Мин стойност		5,25	1,07	4,02	7,76E-07	19800	114,2	
Средна стойност		6,71	1,83	9,59	6,37E-06	44352,50	387,75	
Стандартно отклонение		±0,75	±0,44	±2,62	±3,25E-06	±11192,72	±255,24	

Таблица 2. Коефициент на корелация между някои основни физикохимични параметри (рН, съдържание на хумус, Fe_2O_3 , и общо количество на тежки метали (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu и Zn) при въздушно изсушени обработваеми почви

Table 2. Correlation coefficients between some of the principal physicochemical parameters (pH, content of humus, Fe_2O_3 , total amount of heavy metals (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu u Zn) of air-dried soil probes

Корелация	Коефициент на корелация, r	Статистическа значимост
Fe_2O_3 (mg/kg) като функция на съдържанието на хумус (тегл. %)	0,19	$p > 0,05$
Fe_2O_3 (mg/kg) като функция на рН	0,044	$p > 0,05$
Fe_2O_3 (mg/kg) като функция на съдържанието на тежки метали (mg/kg)	0,27	$p > 0,05$
рН като функция от съдържанието на тежки метали (mg/kg)	0,37	$p < 0,05$
Съдържание на хумус (тегл. %) като функция от съдържанието на тежки метали (mg/kg)	0,20	$p > 0,05$
рН като функция от съдържанието на хумус (тегл. %)	-0,26	$p > 0,05$

Таблица 3. Коефициент на корелация между диелектричните параметри – ϵ_r (10 kHz) и σ (mS/m) и някои основни физикохимични параметри – рН, съдържание на хумус, Fe_2O_3 , общо количество на тежки метали (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu и Zn) при въздушно изсушени обработваеми почви

Table 3. Correlation coefficients between the dielectric parameters ϵ_r (10 kHz) and σ (mS/m) and some of the principal physicochemical parameters (pH, content of humus, Fe_2O_3 , total amount of heavy metals (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu u Zn) of air-dried soil probes

Корелация	Коефициент на корелация, r	Статистическа значимост
ϵ_r , 10 kHz (0.1 MHz) като функция на рН	0,53 (0,39)	$p < 0,05$
ϵ_r , 10 kHz (0.1 MHz) като функция на Fe_2O_3 (mg/kg)	0,45 (0,42)	$p < 0,05$
ϵ_r , 10 kHz (0.1 MHz) като функция на съдържанието на тежки метали (mg/kg)	0,46 (0,42)	$p < 0,05$
ϵ_r , 10 kHz (0.1 MHz) като функция на съдържанието на хумус (тегл. %)	0,39 (0,37)	$p < 0,05$
σ , 1 MHz (0.1 MHz) като функция на рН	0,58 (0,32)	$p < 0,05$
σ , 1 MHz (0.1 MHz) като функция на Fe_2O_3 (mg/kg)	0,44 (0,20)	$p > 0,05$
σ , 1 MHz (0.1 MHz) като функция на съдържанието на тежки метали (mg/kg)	0,53 (0,34)	$p < 0,05$
σ , 1 MHz (0.1 MHz) като функция на съдържанието на хумус (тегл. %)	0,37 (0,49)	$p < 0,05$

казано). Силата на установените линейни зависимости между посочените параметри беше оценена чрез изчисляване на съответните коефициенти на корелация, които са представени в табл. 3.

Данните от табл. 3 показват, че диелектричните свойства на изсушените почвени проби, ϵ_r и σ се влияят в умерена степен от посочените основни почвени параметри – рН, съдържание на Fe_2O_3 , хумус и сборно съдържание на тежки метали. Получените корелационни коефициенти (r от 0,44 до 0,58) и коефициенти на детерминация (R^2 от 0,19 до 0,34) имат умерено

ниски стойности. Изчислените коефициенти на корелация, които оценяват силата на линейна връзка между посочените основни физикохимични параметри на пробите и диелектричните свойства (ϵ_r и σ) на последните се характеризират със статистическа значимост ($p < 0,05$) с изключение на този, показващ зависимостта на σ от Fe_2O_3 на почвите ($p > 0,05$). Статистически по-значимо влияние ($p < 0,05$) върху ϵ_r (10 kHz) и σ (1 MHz) упражнява реакцията на почвата (r = 0,53 и 0,58, съответно), съдържанието на желязо (r = 0,45 и 0,44, съответно), сборното съдържание на тежки метали

($r = 0,46$ и $0,53$, съответно) и съдържанието на хумус ($r = 0,39$ и $0,37$, съответно). Представените резултати показват необходимостта от допълнително изследване върху почви с по-високо съдържание на хумус, където се очакват по-високи коефициенти на корелация.

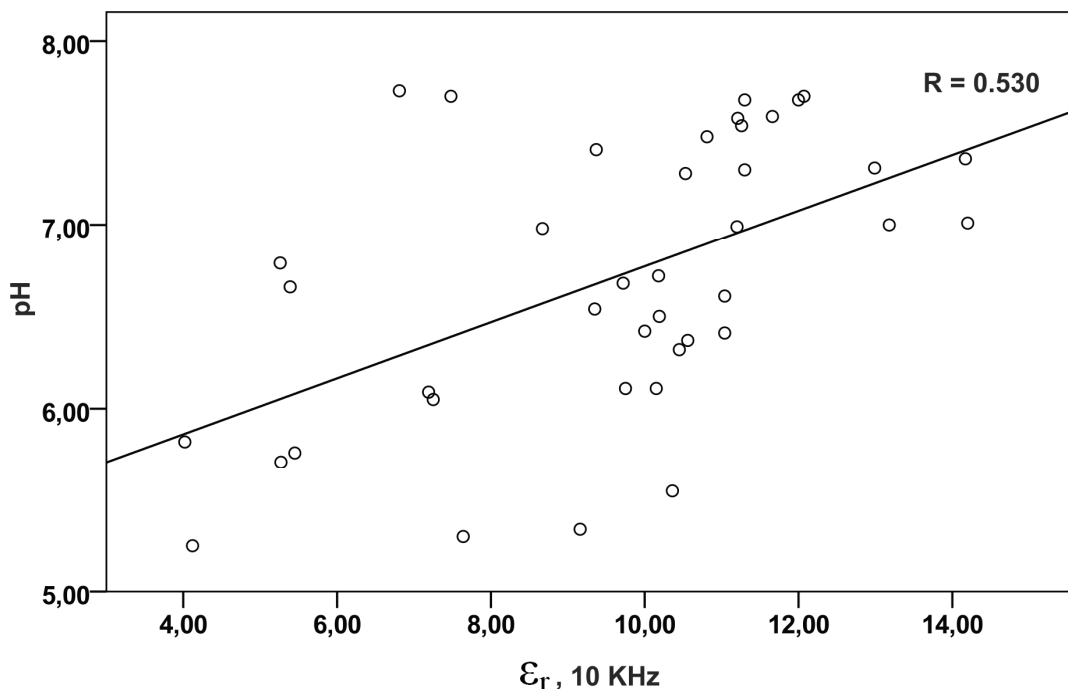
Получените коефициенти на корелация показват, че всеки един от посочените четири основни физикохимични параметъра може самостоятелно да обясни между 20 и 30% от вариацията на съответния диелектричен параметър, ϵ_r и σ , на почвените проби. В съвкупност обаче, тъй като са независими помежду си (табл. 2), те могат да обяснят практически целия интервал от статистическа вариация на диелектричните свойства на почвите.

Изследваните линейни корелационни връзки се влияят по специфичен начин от честотата на тока (табл. 3). Така например влиянието на хумусното съдържание върху σ се регистрира толкова по-силно, колкото е по-ниска честотата на измервателния ток (при 1 MHz, $r = 0,37$, а при 0,1 MHz и по-ниска, $r = 0,49$). За останалите параметри (pH, съдържание на Fe_2O_3 , съдържание на тежки метали: CaO,

MgO и P_2O_5 и K_2O) зависимостта от честотата има обратен ход – колкото честотата на тока е по-висока, толкова тяхното влияние върху σ е по-голямо. Това показва, че хумусната компонента влияе по-силно на активните загуби на енергия (наличието на свободни йони), които доминират при ниските честоти, докато останалите параметри влияят по-съществено на диелектричните загуби (наличието на електрични диполи), които преобладават при високи честоти.

Коефициентът на корелация между самите диелектрични параметри, ϵ_r и σ е много висок и също зависи от честотата на тока. Например, $r = 0,80$ между ϵ_r (10 kHz) и σ (0,1 MHz), но $r = 0,94$ между ϵ_r (10 kHz) и σ (1 MHz). По-голяма чувствителност и коефициент на корелация се получава при такава честота на тока, където стойността на измервания диелектричен параметър е по-висока: за ϵ_r това са ниските честоти (10 kHz), докато за σ това са високите честоти (1 MHz).

Съгласно приведените в табл. 1, 2 и 3 данни, всеки един от наблюдаваните основни почвени параметри (pH, съдържание на хумус,



Фиг. 1. Статистическа зависимост на диелектричната проникваемост ϵ_r (10 kHz) от pH на въздушно изкушени почвени проби

Fig. 1. Statistical representation of the effect of pH on the dielectric permeability, ϵ_r (10 kHz), for a number of air-dried soil probes

на соли на тежките метали и на железни соли) влияе самостоятелно и по независим от останалите начин върху диелектричните свойства на почвените проби. Както беше посочено, това може да обясни получените умерено ниски коефициенти на корелация и детерминираност. По-голяма информативност носи честотната зависимост на σ на почвените проби, защото ϵ_r на почвените проби се влияе по сходен начин от силната диелектрична поляризуемост на органичното вещество и на посочените соли. От своя страна, ефектът на рН върху ϵ_r и σ сигурно е косвен и би могъл да се дължи на влияние на рН върху разтворимостта и дисоциацията на различни йоногенни групи, включително и тази на Fe_2O_3 .

Желязото представлява важна част от общата маса на почвите. Съдържащото се в почвата желязо обикновено е свързано с първичните минерали, глините, оксидите и хидроксидите. Разтворимостта на железните минерали е много ниска, поради което концентрацията

на разтворимото желязо се контролира от аморфния $\text{Fe}(\text{OH})_3$. В добре аерирани сухи почви преобладават тривалентните му йони Fe^{3+} , докато в преовлажнените – двувалентните Fe^{2+} . Количеството на разтворимото желязо силно зависи от почвената киселинност, като концентрацията на Fe^{3+} нараства 1000 пъти при повишаване на рН с единица (Lindsay and Norvel, 1978; Poulton et al., 2004).

Разтворимото желязо достига до корените на растенията чрез дифузия на неговите йони в почвения разтвор или под формата на органични комплекси с разтворените органични киселини, продуктите на деградация на растителните отпадъци, продуктите на микробиологичния метаболизъм и съдържащите се в почвата оксалова и лимонена киселина. Образването на комплекси с функционалните групи на твърдата фаза на органичното вещество намалява подвижните форми на желязото и намалява усвояемостта му от растенията.

Заклучение

Получените физикохимични зависимости при използване на IP метода с различна степен на корелационна връзка могат да се използват за решаване на различни научни и научнопрактически задачи с цел прогнозиране и контролиране на почвените характеристики.

Литература

БДС ISO 10390. 2002. Качество на почвите. Определяне на рН.

БДС ISO 14235. 2002. Качество на почвите. Определяне на органичен въглерод чрез сулфохромоно окисление.

БДС 17.4.55.01. 1985. Опазване на природата. Почва. Общи изисквания към вземането на проби.

Chadwick, P., C. Babiarz, J. Hurley, D. Armstrong. 2006. Influences of iron, manganese, and dissolved organic carbon on the hypolimnetic cycling of amended mercury. *Science of the Total Environment*, 368, 177-188

Cihlar, J., F. T. Ulaby. 1974. Dielectric properties of soils as a function of moisture content. Kansas Univ. Center for Research. RSL Techn. Rep. 177-47. Lawrence, Kansas.

Comas, X., L. Slater. 2004. Low-frequency electrical properties of peat. *Water Resources Research*, 40, W12414.

Curtis, J. O. 2001. Moisture effects on the dielectric properties of soils. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 125-128

Davey, C. L., H. M. Davey, D. B. Kell. 1992. On the dielectric properties of cell suspensions at high volume fractions. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 28, 319-340

Fano, W. G., V. Trainotti. 2001. Dielectric Properties of Soils. In: *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2001. Annual Report Conference, p. 75-78

Gadani, D. H., A. D. Vyas. 2008. Measurements of complex dielectric constant of soils of Gujarat at X- and C-band microwave frequencies. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 37, 221-229

Lindsay, W. L., W. A. Norvel. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, 421-428

Mansoor, N., L. Slater. 2007. On the relationship between iron concentration and induced polarization in marsh soils. *Geophysics*, 72 (1), A1-A5

Method EPA 3052. 1996. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based sediments. In: *Test Methods for Evaluating Solid Waste. Physical/Chemical Methods – SW-846*. US EPA, Washington, DC, USA.

Poulton, S., M. Krom, R. Raiswell. 2004. A revised scheme for the reactivity of iron (oxyhydroxide) minerals towards dissolved sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 3703-3715

Roth, K., R. Schulin, H. Flühler, W. Attinger. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, 26 (10), 2267-2273

Topp, G. C. 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, 16 (3), 574-582

Wu, Y., L. Slater, N. Korte. 2005. Effect of precipitation on low frequency electrical properties of zero valent iron. *Environmental Science and Technology*, 39, 9197-9204