

ВРЪЗКА НА СПЕКТРАЛНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РАСТИТЕЛНОСТ С УСЛОВИЯ НА ОКОЛНАТА СРЕДА

Румяна Кънчева, Георги Георгиев

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: rumik@abv.bg, ggeorgiev@stil.bas.bg*

PLANT SPECTRAL REFLECTANCE IN RELATION TO ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Rumiana Kancheva, Georgi Georgiev

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: rumik@abv.bg, ggeorgiev@stil.bas.bg*

Keywords: *plant spectral reflectance, vegetation indices, alfalfa, heavy metal pollution, cadmium, soil properties, phenological stage,*

Abstract: *Experiments have been performed with various species in order to investigate the impact of heavy metal pollution on plant morphology, physiology and productivity, as well as to study the relationships between plant spectral reflectance features and the applied stress factor. Soil properties (organic content and pH) and nitrogen fertilization rates and forms have been regarded as additional environmental conditions. In this paper, only a part of the data analysis results are presented related to the examination of the effects of varying cadmium contamination on the spectral reflectance features of alfalfa. The soil type and plant growth stage have been considered as well.*

Въведение

Замърсяването на околната среда с токсични вещества представлява сериозен проблем в много отношения и засяга редица глобални въпроси като съхраняване на биологичното разнообразие, поддържане на екологичното равновесие, опазване на природните ресурси и пр. Замърсяването на въздуха, почвите и водите с тежки метали носи предимно антропогенен характер (транспорт, индустрия, изкуствено наторяване) и има не само тежки, но и дълготрайни последици [1-4]. В земеделието тези последици се изразяват в снижаване на почвеното плодородие, доибува и екологичното качество на продукцията. В световната и наша литература им се отделя голямо внимание, като провежданите изследвания са насочени както към изучаване на въздействието на тежките метали върху физиологията на растенията, така и към проучвания, свързани с възможността за биоремедиация на замърсени почви [5-9]. Наред с тези въпроси се разработват методи за дистанционна оценка на състоянието и стрес-диагностика на растителни обекти по спектрометрични данни [14-23]. Анализът на спектралните характеристики и техните изменения под въздействие на фактори от околната среда лежи в основата на дистанционния мониторинг.

Първоначалното ни намерение да бъдат представени редица резултати от изследвания, посветени на влиянието на различни условия на отглеждане (почвени свойства, наторяване, варуване, замърсяване) на земеделски култури върху биофизикохимичните им и спектрални характеристики се оказа неизпълнимо в рамките на една работа поради големия обем на серията експерименти и получените данни. Затова в настоящето изложение ще разгледаме само кадмиевото замърсяване като стресов фактор при развитието на люцерна, като ще се спрем основно на влиянието му върху измененията на спектралните отражателни характеристики на растенията. Кадмият е високотоксичен елемент, който лесно се абсорбира от растенията и натрупва в земеделската и животинска продукция, като времето му на полуживот на елиминация е 10-30 години [4,6,10-13]. Това го прави особено опасен като замърсител на околната среда.

Материали и методи

Изведен е съдов опит с люцерна (*Medicago sativa*). Растенията са отглеждани върху два типа почва с различна киселинност: излужен чернозем (pH=7-7.5) и сива горска почва (pH=5-5.5). Като стрес-фактор е използвано замърсяване на почвата с Cd чрез въвеждане на $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ с концентрации на тежкия метал: 0; 10; 20; 30; 40 и 80 mg/kg при чернозема и 0; 5; 10; 20; 30 и 40 mg/kg при сивата горска почва. Експериментът е проведен от засяване на люцерната до втори откос включително. Ежеседмично са извършвани измервания на спектралните отражателни характеристики на растенията с 43 канален спектрометър в диапазона (400-820) nm, като са обхванати различните фенологични фази на развитие.

Основна цел на настоящата работа е да изследва връзката между характеристики на спектралната отражателна способност на растенията и различните концентрации на кадмиево замърсяване. Задачата е да се оцени тяхната чувствителност и информативност по отношение на изследвания стресов фактор. Съставна част от задачата е да се установи допълнителното влияние върху тази връзка на почвените свойства (тип и pH реакция), както и влиянието на фенологичната фаза на растенията. По този начин от цялостната, далеч по-обширна схема на експеримента, в случая използваме две групи променливи: - независими и контролирани фактори са нивата на замърсяване с тежкия метал, почвеният тип и фазата на развитие на растенията; - зависимите величини са измерваните спектрални коефициенти на отражение r_λ и изчисляваните вегетационни индекси VI, които представляват различни преобразувания на спектралните отражателни характеристики и са най-често предпочитани за изследване и мониторинг на растителност във видимия и близкия инфрачервен диапазон.

За да се определят с достатъчна сигурност статистическите оценки на изследваните зависимите величини (спектралните признаци) са извършени повторни експерименти за всяка от осъществените комбинации от фактори, което означава при вариране на почвения тип и нивото на стресовия фактор (концентрацията на Cd в почвата). За всеки от тези варианти на опита са изведени по 5 повторения. Извършен е статистически анализ на данните, включващ:

- количествена характеристика на спектралните признаци VI на растенията (т.е. на зависимата променлива) като функция от нивото на действащия стресов фактор и с отчитане на почвения тип и фенофазата. Това включва оценка на случайното разсейване на спектралните признаци (т.е. в рамките на даден вариант при едно и също ниво на фактора), както и оценка на значимостта на вариациите им като функция от различните нива на действащия фактор. Статистическата значимост на тези вариации позволява изводи относно количествената спектрална „различимост“ на стресовия фактор (концентрация на тежкия метал). Проверявана е чрез t-критерия на Стюдънт.

- дисперсионен анализ (ANOVA) за определяне на влиянието на отделен фактор или комбинация от фактори, особено подходящ при сравнително неголям брой измервания. Резултатът дава основание да се направи заключение (посредством F-критерия на Фишер) дали даден фактор влияе върху изследваната величина, т.е. извод относно статистическата значимост на това влияние.

- корелационен анализ за установяването на наличие и определянето на силата на връзката (посредством коефициента на корелация) между спектралните признаци и фактора замърсяване (с отчитане на факторите почва и фенофаза).

Резултати и обсъждане

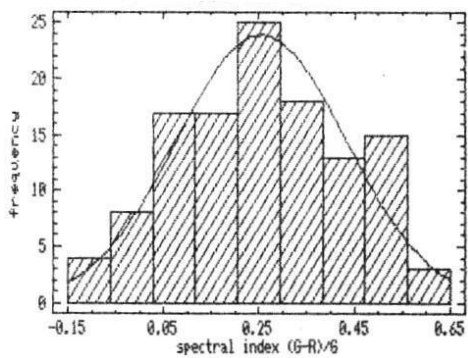
Най-често прилагани в световната практика при обработката на многоспектрални данни за растителни обекти са различни съчетания на коефициентите на отражение r_λ за две или повече дължини на вълните λ (вегетационни индекси). В Табл. 1 са приведени формулите на част от изследваните в проведения експеримент VI.

Таблица 1. Вегетационни индекси

1	$(r_{800}-r_{670})/(r_{800}+r_{670})$	7	$(r_{720}-r_{670})/r_{720}$
2	$(r_{550}-r_{670})/(r_{550}+r_{670})$	8	$r_{670}/(r_{800}+r_{550})$
3	r_{710}/r_{670}	9	$r_{550}/(r_{650}+r_{670})$
4	$(r_{800}-r_{670})/r_{800}$	10	$r_{670}/(r_{800}+r_{670}+r_{550})$
5	$(r_{550}-r_{670})/r_{550}$	11	$r_{800}/(r_{670}+r_{680}+r_{690}+r_{700}+r_{710}+r_{720})$
6	$(r_{720}-r_{700})/r_{720}$	12	$\sqrt{(r_{800}-r_{670})/(r_{800}+r_{670})+0.5}$

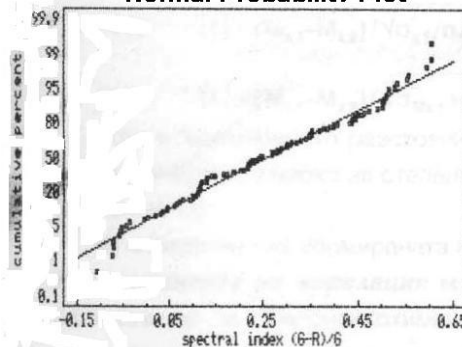
Начална стъпка от първичната обработка на данните е оценка на разпределението на променливите. Параметричните статистически критерии, които се прилагат при количествени величини, изискват предварително да е доказано, че разпределението им е нормално. Затова в повечето случаи е извършена проверка за нормалност на разпределението на VI въпреки ограничен брой на измерванията. Илюстрация е показаният на Фиг. 1 пример за VI₅ (опит върху сива горска почва за фаза бутонизация).

Frequency histogram & fitted normal distribution



а)

Normal Probability Plot



б)

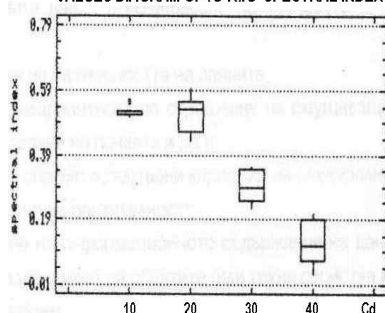
Фиг. 1. Честотна хистограма на стойностите на VI₅ и апроксимация с нормално разпределение (а); кумулативен процент на вероятността за нормално разпределение (б)

Като показатели за разсейването на зависимите променливи VI в рамките на варианта (т.е. при дадено ниво на замърсяване) са определяни средната стойност, стандартното отклонение и коефициентът на вариация. Проверка на статистическата достоверност на различията между спектрални признаци VI от нивото на стресовия фактор е направена чрез t-критерия на Стюдънт при даден почвен тип и фиксирана фенофаза. В Табл. 2 са дадени стойности на t-критерия, изчислени за VI₅. Значимите му стойности (при доверителна вероятност $p < 0.05$) означават, че е възможна спектрална разделимост между вариантите с различно замърсяване. Спектрално неразличими в този пример са съседните нива на замърсяване 0 и 5 mg/kg, 5 и 10 mg/kg и 10 и 20 mg/kg. Във всички останали случаи (между концентрации 0 и 10, 20, 30 и 40, между 5 и 20, 30, 40, между 10 и 30, 40, между 30 и 40) е възможна количествена оценка на стресовия фактор по избрания спектрален признак. Същите изводи са илюстрирани частично от Фиг. 2а, представляваща диаграма на стойностите на VI₅ в зависимост от Cd в почвата. Припокриването в стойностите на спектралния индекс при Cd 10 и 20 mg/kg означава невъзможност за различаване на тези две нива на замърсяване, което не се наблюдава в останалите случаи. На Фиг. 2б, като нагледен пример за различията в отражателната способност на растенията, са показани измерените спектрални характеристики и доверителните им интервали за контролни и замърсени растения.

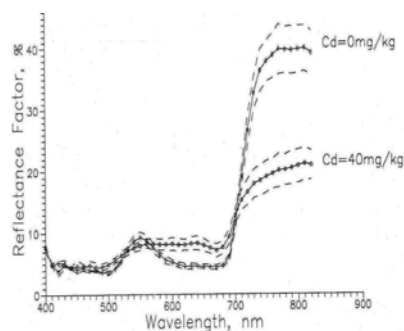
Cd	5	10	20	30	40
0	--	2.8	7.0	8.4	10.8
5	---	---	3.8	5.7	8.6
10			---	2.6	5.6
20				3.0	6.7
30					3.9

Таблица 2. Стойности на t-критерия на Стюдънт за VI₅ при различно замърсяване

VALUES DIAGRAM OF (G-R)/G SPECTRAL INDEX



а)



б)

Фиг. 2. Диаграма на стойностите на VI₅ при различни нива на замърсяване (а); спектрални отражателни характеристики на контролни и замърсени растения върху сива горска почва (б)

Вегетационните индекси, за които са установени статистически достоверни разлики при различните стойности на стресовия фактор, са подложени на корелационен и дисперсионен анализ, целящ изследване на връзката им с нивото на кадмиево замърсяване. В Табл. 3. са

представени резултати от линейния корелационен анализ на VI с концентрацията на Cd в сивата горска почва. Наблюдава се силна зависимост на спектралните характеристики на растенията от степента на замърсяване, като връзката варира по време на развитието на растенията (A - същински лист, B - розетка, C – бутонизация, D - преди цъфтеж), усилвайки се в по-късните фенологични фази с усилване на токсичното въздействие на тежкия метал. Интересно е да се отбележи, че VI, разположени в спектралната област на червеното отместване (№ 7, 12, 13, 17) се оказват като цяло сред най-силно корелираните с нивото на замърсяване през целия наблюдаван период, а също и при двете почви.

Таблица 3. Коефициенти на корелация между концентрацията на Cd в сива горска почва и VI на люцерна в различни фенологични фази

VI _№	A	B	C	D
1	-0.69	-0.74	-0.83	-0.91
2	-0.67	-0.79	-0.83	-0.9
3	-0.69	-0.74	-0.81	-0.88
4	-0.68	-0.73	-0.83	-0.89
5	-0.68	-0.79	-0.84	-0.89
6	-0.81	-0.78	-0.85	-0.92
7	-0.74	-0.79	-0.81	-0.87
8	0.71	0.75	0.84	0.9
9	-0.68	-0.77	-0.83	-0.91
10	0.71	0.75	0.84	0.91
11	-0.67	-0.79	-0.85	-0.9
12	-0.68	-0.78	-0.83	-0.9

Таблица 4. F-отношение на съвместното влияние на Cd и фенофазата върху VI за люцерна върху сива горска почва

VI _№	F
2	44.4
4	35.1
5	43.8
6	57.4
7	42.2
8	37.4
9	47.7
10	40.4
11	40.8
12	39.7

При опитите върху чернозем корелацията е по-слаба, макар и значима (0.65-0.77). Тук обаче тя е резултат от формирането на два клъстера от стойности на вегетационните индекси за Cd съответно от 0 до 40 mg/kg от една страна и крайно високото замърсяване от 80 mg/kg от друга страна. Това означава, че VI са нечувствителни към всички останали изменения на стресовия фактор, което прави коефициента на корелация (макар и висок) ненадежден показател за силна взаимовръзка на VI и Cd.

Посредством двумерен дисперсионен анализ е изследвано комбинираното влияние върху спектралните характеристики на растенията на два фактора – замърсяването и фенологичната фаза (отделно за двете почви). Доколко съществено е съвместното им влияние се дава от F-критерия на Фишер. Част от резултатите за случая на сива горска почва са показани в Табл. 4. Значимите стойности на F-отношението за случая на чернозем са между 27 и 35.

Изводи

Замърсяването с Cd води до статистически значими изменения на спектралните свойства на растенията. Наблюдава се висока корелация между спектралните характеристики и концентрацията на Cd в почвата, като в по-силна степен тя е изразена след началните фази на вегетация. Спектрални индекси, които проявяват тясна връзка със стресовия фактор, могат да бъдат използвани за мониторинг на растителност и стрес-диагностика.

При чернозема влиянието на тежкия метал се проявява слабо, различия в състоянието на растенията се наблюдава единствено при екстремна концентрация на замърсителя, което прави спектралната различимост за останалите концентрации невъзможна.

Най-голяма чувствителност към нивото на замърсяване имат вегетационни индекси с дължини на вълните около 680-730 nm, което се обяснява със зависимостта на спектралното отражение в тази област от пигментното съдържание на растенията и токсичното действие на тежкия метал, изразяващо се в силно инхибиране на хлорофила.

Резултатите от проведеното изследване сочат, че както почвеното замърсяване, така почвените свойства (в случая киселинност и органично съдържание) и фенологичната фаза на развитие са статистически значими причини за изменения в спектрални характеристики на растенията. Това дава основание да се направи положителен извод относно използването на спектрални признаци за оценка на условията на околната среда.

Следващ етап от анализа на получените в хода на експеримента данни е регресионното моделиране на връзките между стресовия фактор, спектралните признаци и биофизикохимични характеристики на растителността, резултати от които са предмет на следващи публикации.

Литература:

1. Slam Ejazul, Yang Xiao, He Zhen, Mahmood Qaisar, Assessing potential dietary toxicity of heavy metals in selected vegetables and food crops, *Journal of Zhejiang University Science B*, 2007 8(1):1-13.
2. Shafiq, M. and M. Z. Iqbal. The toxicity effects of heavy metals on germination and seedling growth of *Cassia siamea*. Lamark. *Journal of New Seeds*, 2005, 7: 95-105.
3. Iqbal, M. Z. and Y. Shazia. Reduction of germination and seedling growth of *Leucaena leucocephala* caused by lead and cadmium individually and combination. *Ekologia (Braslava)*, 2004, 23(2): 162-168.
4. Dudka, S. and Adriano D. C. Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review. *J. Environ. Qual.* 1997, 26, 590-602
5. Vassilev, A., Lyubka Koleva, Malgozata Berova, Nevena Stoeva, Development of a plant test system for evaluation of the toxicity of metal contaminated soils. I. Sensitivity of plant species to heavy metal stress. *Journal of Central European Agriculture Vol 8 (2007) No 2*, 135-140
6. Tomov, A., Kuzmanova, Exploring possibilities of cultivation unpolluted plant produce in Pb and Cd contaminated sites. *Journal of Central European Agriculture Vol 6 (2005) No 2*, (121-126
7. Khan, A. G., C. Kuek, T. M. Chaudhry, C. S. Khoo and W. J. Hayes, Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation, *Chemosphere* 21 (2000) 197 -207
8. Alexander, A. Kamnev and Daniel Vanderlelie, Chemical and Biological Parameters as Tools to Evaluate and Improve Heavy Metal Phytoremediation, *Bioscience Reports*, Vol. 20, No. 4, 2000, 239-258
9. Valentina V. Umraniya, Bioremediation of toxic heavy metals using acidothermophilic autotrophes *Bioresource Technology* 97 (2006) 1237–1242
10. Alvarez-Ayuso, E.. Cadmium in soil-plant systems: an overview. *International Journal of Environment and Pollution*, 2008, 33(2-3): 275-291.
11. Anjum, N.A., S. Umar, A. Ahmad, M. Iqbal and N.A. Khan. Ontogenic variation in response of *Brassica campestris* L. to cadmium toxicity. *J. of Plant Interac.* 200, 83(3): 189-198.
12. Breckle, S.W. and H. Kahle. Effects of toxic heavy metals, Cd, Pb on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L). *Vegetatio*, 1992, 101: 43-53.
13. Azmat, R., Zill-e-Huma, A. Hayat, T. Khanum and R. Talat. The inhibition of bean plant metabolism by cadmium metal: Effects of cadmium metal on physiological process of bean plant and *Rhizobium* species. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 20058, (3): 401-404
14. Baret, F., Houliès V., Guérif M., Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. *J. Exp Bot.* 2007; 58(4):869-880
15. Chaerle, L., Leinonen I., Jones H.G., VanDerStraeten D., Monitoring and screening plant populations with combined thermal and chlorophyll fluorescence imaging. *J Exp Bot.* 2007; 58(4):773-784.
16. J. G. P. W. Clevers, L. Koolstra and E. A. L. Salas, Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data, *Int. J. Remote Sensing*, 2004, VOL. 25, , 1–13
17. Kooistra, L., Leuven, R. S. E. W., Wehrens, R., Nienhuis, P. H., and Buydens, L. M. C., „A comparison of methods to relate grass reflectance to soil metal contamination. *International Journal of Remote Sensing* 2003.
18. Reusen, L. Bertels, W. Debruyne, B. Deroonde, D. Franssaer, S. Sterck, Species Identification and Stress Detection of Heavy-Metal Contaminated Trees, Proceedings of the US EPA ‘Spectral Remote Sensing of Vegetation’ conference, March 12-14 2003, Las Vegas, Nevada, http://publications.vgt.vito.be/documents/BD/heavy_metal_vegetation_stress.pdf
19. Machel, D. Wilson, Susan L. Ustin, and David M. Rocke, Classification of Contamination in Salt Marsh Plants Using Hyperspectral Reflectance, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 42, NO. 5, 2004
20. Kancheva, R. Borisova, D., Plant Spectral Signatures as Growth Stress Indicators, *Information and Communication Technologies*, Damascus, 2006, 355–360.
21. Mehandjiev, A., S. Chankova, Y. Todorova, S. Noveva, D. Mishev, R. Kancheva, D. Borisova, R. Hristova, V. Kapchina. Cytogenetic and spectrometric study on cadmium pollution in peas. *Compt. Rend. Acad. bulg. Sci.*, T.53, No4, pp.39-42, 2000.
22. Kancheva, R., D. Borisova, V. Kapchina-Toteva, S. Chankova, N. Naidenova. Effects of Cadmium Pollution in *Pisum sativum* Depending on the Growing Conditions. *Compt. Rend. Acad. bulg. Sci.*, T.54, No5, pp.21-26, 2001.
23. Kancheva, R., D. Borisova. Plant Physiological Stress Detected by Spectral Features. “Contemporary Problems of Solar-Terrestrial Influences”, ISBN 654-91424-1-8, pp.174-177, 2003.